

Energieeffiziente Abscheidung von hochkonzentrierten flüssigen Aerosolen mit einem Autogenen Raumladungsgetriebenen Abscheider (ARA)

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

Dissertation

von

Magister Sergiy Lebedynskyy

aus Charkiw (Ukraine)

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. U. Riebel
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. C. Egbers

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2006-2012 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Mechanische Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Riebel, für seine Unterstützung während der Betreuung dieser Arbeit und für seinen Einsatz für die Doktoranden des Lehrstuhls. Während der Arbeit an vielen interessanten Projekten des Lehrstuhls durfte ich sehr viel von ihm fachlich und persönlich lernen.

Ich danke der Sekretärin Frau Renate Choyna und dem Labortechniker Herrn Frank Schlag für ihre ständige Hilfsbereitschaft und Unterstützung im wissenschaftlichen Alltag.

Ich danke den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt Herrn Uwe Zernsdorf und Herrn Wilfried Wittkopf für ihren sehr zeitintensiven Einsatz und Unterstützung während der Auslegung und des Aufbaus zahlreicher Laboranlagen und Geräte.

Ich danke Herrn Joachim Schwentner aus der Elektronikwerkstatt für seine Unterstützung während der Entwicklung von verschiedenen Elektronikgeräten und Messanordnungen.

Für die angenehme Zusammenarbeit möchte ich den ehemaligen und den derzeit noch aktiven Doktoranden des Lehrstuhls Gorat Stommel, Xiaoi Gou, Shaoliang Wang, Robert Mnich, Carlos Morales, Plamen Toshev, Jörg Perwin, Andreas Groll, Yuri Aleksin und Amanbek Checheibaev ganz herzlich danken. Alpesh Vora danke ich für seine Hilfe bei der Erstellung der Simulation.

Meinem ehemaligen Bürokollegen Christian Lübbert danke ich für sein ansteckendes wissenschaftliches Engagement und unendliche Diskussionen.

Meinem Bruder Volodymyr Lebedynskyy danke ich für schöne gemeinsame Zeit am Lehrstuhl, für die Unterstützung bei der Lösung schwieriger Aufgaben und für die gemeinsamen Fußballspiele.

Ich danke der Fa. Keller-Lufttechnik GmbH und persönlich den Herren Norbert Frank und Hans-Jörg Straberger für die Mitarbeit an dem Projekt und wünsche viel Erfolg auf dem neuen Gebiet der elektrostatischen Abscheider.

Ich danke den Mitgliedern des Prüfungsausschusses: dem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. C. Egbers, dem Mitglied Prof. Dr.-Ing. F. Mauß, dem Beisitzer Dr.-Ing. L. Straßberger.

Auf der privaten Ebene möchte ich meiner liebsten Frau Yuliya und meiner kleinen süßen Tochter Alexandra für den ständigen Rückhalt herzlich bedanken. Auch meinem Neffen Erick, der Nichte Alicia und der Schwägerin Katarina danke ich für schöne und abwechslungsreiche gemeinsame Zeit in Cottbus. Vladyslav Krasnoshchok und Vadym Trykoz danke ich dafür, dass die mich immer wieder von der Arbeit künstlerisch abgelenkt haben.

Ich danke meinen Eltern, Volodymyr und Lyudmyla Lebedynskyy, für ihre Unterstützung meiner Reise nach Deutschland und dafür, dass die immer für mich da waren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Elektroabscheider.....	4
2.1	Allgemeines zu den Elektroabscheidern.....	4
2.2	Theoretische Grundlagen.....	6
2.2.1	Unipolare Partikelaufladung	6
2.2.2	Corona-Entladung	9
2.2.3	Elektrischer Wind.....	14
2.2.4	Grundlagen der elektrostatischen Abscheidung	15
2.2.5	I-U-Charakteristik eines partikelfreien Elektroabscheiders	17
2.2.6	Elektrischer Überschlag im Elektroabscheider	20
2.2.7	Corona Quenching. Das Modell von Lübbert	21
2.2.8	Elektrostatische Dispersion	24
2.2.9	Elektrostatisches Abtropfen und Elektrospray	28
3	Stand der Technik	31
3.1	Mehrstufige Elektroabscheider	31
3.2	Raumladungsabscheider	33
3.3	Erzeugung der Hochspannung mit unipolar geladenen Aerosolen	35
3.4	Energieverbrauch der Abscheidung. Angaben aus der Literatur.	36
3.5	Zusammenfassende Bewertung	36
4	ARA-Konzept. Voruntersuchungen	38
5	Auslegung der ARA-Anlage	42
5.1	1. Stufe. Auflader	42
5.1.1	Ziele der Aufladung	42
5.1.2	Energiebedarf der Aufladung	45
5.1.3	Steuerung des Aufladers.....	47
5.1.4	Auswahl der Auflader-Polarität	47
5.2	Transport des geladenen Aerosols und begleitende Ereignisse.....	48
5.3	2.Stufe. ARA-Kollektor	49
5.3.1	Ladungs-Kollektorelektrode.....	49
5.3.2	Elektrohydrodynamische Effekte am Eintritt in die LKE	50
5.3.3	Elektrostatisches Abtropfen in der KE.....	50
5.3.4	Partikelabscheidung im FE-Bereich.....	51
5.3.5	Elektrische Kapazität und Kräfte zwischen Elektroden	51
5.3.6	Entladungskaskade	52
5.3.7	Elektrische Isolation	53
6	Laboranlage für 1000 m³/h	55
6.1	Versuchs- und Messaufbau.....	55
6.1.1	Laboranlage für 1000 m ³ /h.....	55
6.1.2	Testaerosol	61

6.1.3	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).....	62
6.1.4	Messung hoch konzentrierter geladener Aerosole. Aerosolverdünnung.....	64
6.1.5	Radioaktives Faraday-Cup Elektrometer	66
6.2	Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	66
6.2.1	Untersuchungen zum stromgesteuerten Aufladerbetrieb	66
6.2.2	Mobilitätsmessungen.....	75
6.2.3	Untersuchungen zu den Entladungsvorgängen im ARA-Kollektor.....	76
6.2.4	Ermittlung der Trennkurven.....	78
6.2.5	Untersuchungen zum Überschlag im Plattenpaket bei einem unkontrollierten Feldaufbau	80
6.2.6	Potentialverlauf der PFE nach dem Abschalten des Aufladers.....	82
6.2.7	Messung der Ozonkonzentration.....	82
6.3	Zusammenfassende Bewertung der Messergebnisse.....	83
7	Weitere Untersuchungen zur Aerosolselfentladung	84
7.1	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Aerosolselfentladung.....	85
7.2	Nachweis von Selbstentladung	86
7.3	Einfluss auf die elektrostatische Dispersion	87
7.4	Elektrohydrodynamische Strömung durch Selbstentladung	88
7.5	Entladungsverlauf	90
7.6	Fazit.....	91
8	ARA-Prototyp	92
8.1	Die Inbetriebnahme des ARA-Prototyps. Untersuchungen im Labor	95
8.1.1	Messungen am Auflader.....	95
8.1.2	Messungen am ARA-Kollektor.....	96
8.1.3	Messung der Trennkurven.....	99
8.1.4	Versuch zur Unterdrückung des Corona-Stroms im Plattenpaket durch die Beschichtung von Elektrodenkanten mit Isolierlack.....	99
8.1.5	Versuche zur Beurteilung der elektrischen Isolation	101
8.1.6	Messung der Ozonkonzentration.....	102
8.2	3-D-Modellierung der ARA-Stufe.....	103
8.2.1	Gleichungssystem.....	104
8.2.2	Berechnungsalgorithmus	104
8.2.3	Die Geometrie und das Gitternetz	105
8.2.4	Modell-Parameter und Randbedingungen.....	107
8.2.5	Ermittlung der Modell-Ausgangsdaten	109
8.2.6	Simulationsergebnisse	111
8.3	Bewertung der Ergebnisse	119
9	Zusammenfassung	120
10	Symbolverzeichnis	121
11	Literatur	124
12	Anhang.....	133

1 Einleitung

Der derzeitige Entwicklungsstand von elektrostatischen Abscheidern bietet dem Endnutzer eine Vielfalt von verschiedenen Konzepten und ihren Kombinationen an. Ein- und zweistufige Elektroabscheider, Raumladungsabscheider, Ionisationswäscher (Bioelektrogeruchsabscheider) und elektrostatisch unterstützte Filteranlagen finden den Einsatz in der Industrie, der Klimatechnik und auch in den Privathaushalten. Für eine optimale Konzept-Auswahl und Auslegung kommen wechselwirkende Faktoren wie Investitions- und Betriebskosten, Abgaszusammensetzung und angestrebte Reingaswerte ins Spiel.

Für die Abscheidung von „schwierigen“ (flüssigen, klebrigen und hochkonzentrierten) Aerosolen ist der Nass-Elektroabscheider eine Alternative zu den bisher eingesetzten Wäschern und Filteranlagen. Durch den Einsatz eines Elektroabscheiders können viel bessere Abscheideleistungen erreicht werden als bei Wäschern, so dass eine Raumluftrückführung ermöglicht würde. Auch der spezifische Energieverbrauch der Elektroabscheider liegt mit 0,05-2 kWh/1000 m³ gegenüber 0,5-5 kWh/1000 m³ bei Wäschern deutlich niedriger. Die filternden Abscheider weisen zwar hohe Abscheidegrade auf, haben aber aufgrund von sehr gehandicapten Abreinigungsmöglichkeiten sehr kurze Standzeiten, die bei den Wäschern und den Elektroabscheidern um Größenordnungen länger sein können. Zugleich hat der Elektroabscheider aber die Nachteile von deutlich höheren Investitionskosten (insbesondere für kleine Einheiten), und erfordert wegen der Hochspannung Fachpersonal für die Wartung. Auch die Möglichkeit einer Raumluftrückführung ist durch die üblicherweise mehrfach über den Toleranzgrenzen liegenden Ozonwerte stark eingeschränkt.

Autogene raumladungsgetriebene Abscheidung (ARA) ist ein neues technisches Konzept, das den Betrieb von Elektroabscheidern bei wesentlich niedrigen Spannungen und Stromstärken ermöglicht, und damit sowohl die Betriebskosten weiter senkt, als auch die Investitionskosten deutlich verbilligt. Die stark reduzierte Leistungsaufnahme resultiert in eine sehr geringe Ozonproduktion, sodass die Realisierung einer Raumluftrückführung ermöglicht wird.

Die vorliegende Arbeit basiert auf den Ergebnissen, die im Rahmen eines Industrieprojektes gewonnen wurden, das in der Kooperation mit der Fa. Keller-Lufttechnik GmbH bearbeitet und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde.

Das Konzept der autogenen raumladungsgetriebenen Abscheidung setzt einen neuen Standard für hoch effiziente und energiesparende Abscheidung von „schwierigen“ Aerosolen und bietet entscheidende technisch-wirtschaftliche Vorteile, die der Durchsetzung von kleinen Elektroabscheidern verhelfen sollen.

Zielgebiet der Anwendung ist zunächst die Abscheidung von Ölnebeln aus der Metallverarbeitung.

2 Elektroabscheider

2.1 Allgemeines zu den Elektroabscheidern

Elektroabscheider (bekannt auch als Elektrofilter) spielen eine sehr große Rolle in der modernen Gasreinigung. Sie werden zur Reinigung von Industrieabgasen eingesetzt, wie z.B. in Kohlenkraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementfabriken. Die Elektrofilter eignen sich vor allem für die Entstaubung von sehr großen Gasmengen, weil sie einen niedrigen Druckverlust erzeugen, eine geringe Wartung erfordern und geringen Lärmpegel haben. Auch im kleintechnischen Bereich kommen sie zum Einsatz (Klimatechnik, Automobilindustrie).

Das Funktionsprinzip eines Elektroabscheiders kann als Abfolge von vier Schritten dargestellt werden: Erzeugung der Ladungsträger (Gasionen und Elektronen) durch eine Corona-Entladung an einer Sprühelektrode (SE); Aufladung der abzuscheidenden Partikel; deren Transport im elektrischen Feld zur Niederschlagselektrode (NE); Entfernung der abgeschiedenen Partikel von der Niederschlagselektrode.

Je nach Bauweise unterscheidet man Platten- bzw. Rohrelektrofilter (Abbildung 2-1). Das Rundprofil ist eine Idealform, wird aber aus wirtschaftlichen Gründen (aufwändige Fertigung; doppelwandige Bauart des Abscheiders) nur selten verwendet. Als eine Kompromisslösung werden auch eine hexagonale Rohr-Form [Sur81] oder ein wellenförmiges Profil von Niederschlagselektroden beim Plattenabscheider eingesetzt [May85].

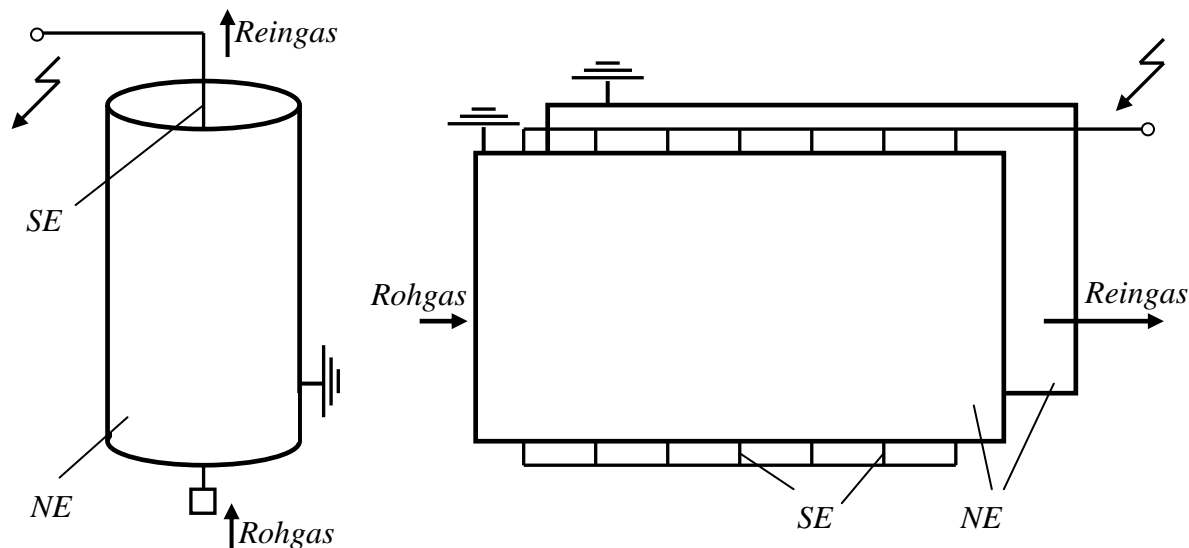


Abbildung 2-1 Typische Elektroabscheiderbauweisen: Rohr- und Plattenausführung

Auch das Material von Niederschlagselektroden ist sehr variabel. Z.B. für den Einsatz in korrosiven Atmosphären werden oft Elektroden aus Kunststoff verwendet. Auch für den allgemeinen Gebrauch sind diese Elektroden wegen ihrer relativ niedriger Kosten und kleinerer Gewichte von Interesse. Die Erdung von der Elektrodenoberfläche kann in diesem Fall durch einen Flüssigkeitsfilm erfolgen. Auch geringe Filmleitfähigkeiten reichen dabei aus [Wad97]. Durch die Elektrodenbeschichtung mit Kunststoffen mit höherem spezifischen Widerstand als der der Luft, können elektrische Überschlüge verhindert werden und der

Betrieb bei höheren Spannungen ermöglicht werden (z. B. in der 2.Stufe eines zweistufigen Abscheiders) [Nar81].

Die Abreinigung von Niederschlagelektroden erfolgt typischerweise durch das Abklopfen. Verwendung von wellenförmigen Elektrodenprofilen begünstigt den Abreinigungsvorgang: der Staub fällt in strömungsruhigen Zonen herunter [May85]. Auch die Druckstoß-Abreinigung kann angewendet werden [Rie04].

Im Fall, wenn es um die Abscheidung von Aerosolen geht, die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften nicht oder schwer von der Niederschlagselektrode abgereinigt werden können, werden Nasselektroabscheider eingesetzt. Es wird zwischen kontinuierlich und intermittierend abgereinigten Nasselektrofiltern unterschieden [Sie91]. Die deutlich geringere Komplexität des Abscheidenvorgangs im nassen Betrieb macht den Nassabscheider für die Untersuchungen zum Partikeltransport im elektrischen Feld attraktiv: Im Nass-Elektroabscheider kann ein Partikel als abgeschieden gelten, wenn es die Niederschlagselektrode erreicht hat. Die Bildung des Staubkuchens und die damit verbundenen Einwirkungen auf den Abscheidenvorgang werden damit ausgeschlossen.

Die Plattenelektroabscheider kommen meistens bei der trockenen Gasreinigung zum Einsatz, die Rohrelektroabscheider werden im Gegensatz öfter beim nassen Betrieb eingesetzt [Wad97, Sie91].

2-Stufige Elektroabscheider

Das Konzept „zweistufig“ wurde zuerst im Jahr 1910 vom Schmidt [Whi63] entwickelt und patentiert. Die ersten Anwendungsgebiete waren auf die Raumlufthereinigung in Büros, Krankenhäusern u. a. begrenzt. Ab Mitte der 60-er Jahre begann der Einstieg in die Industrieanwendungen.

Bei den meisten Anwendungen (insbesondere bei Partikelgröße $>1\mu\text{m}$) verläuft die Partikelaufladung viel schneller als die Partikelabscheidung aus dem Gasstrom (Sättigungsladungszustand wird innerhalb von einigen Zehnteln Sekunden erreicht). Der Aufladevorgang (durch Corona-Entladung) benötigt ein stark inhomogenes elektrisches Feld und wird durch den Stromfluss gekennzeichnet, während für die Partikelabscheidung ein stromloses homogenes elektrisches Feld ausreichend ist. Dementsprechend wird über dem Großteil der Sprühelektrodenlänge eines einstufigen Elektroabscheiders die Corona-Leistung nicht genutzt. In einem zweistufigen Verfahren werden diese Vorgänge getrennt (Abbildung 2-2).

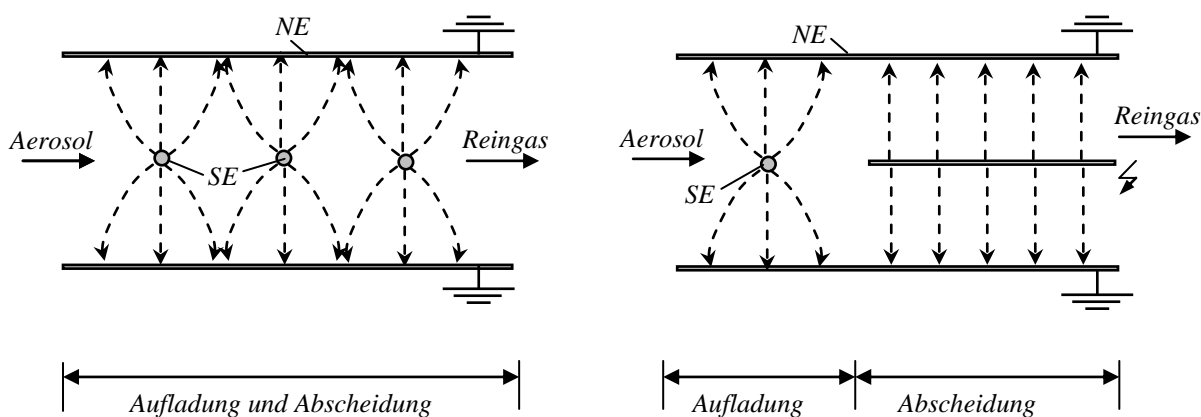


Abbildung 2-2 Prinzip-Schema der einstufigen und zweistufigen Elektroabscheidung

Die meisten zweistufigen Rohr-EA werden in Industrieanwendungen eingesetzt, wo die Elektrodenoberflächen kontinuierlich vom durch hohe Feuchtegehalte des Gases gebildeten Flüssigkeitsfilm gereinigt werden.

Aufgrund von einer niedrigeren Ozonproduktion werden 2-stufige EA für die Reinigung von Raumluft, als Teil der Klimaanlage, eingesetzt. Die Ionisationsstufe ist typischerweise positiv [Boe97]. Die Beispiele und Besonderheiten der mehrstufigen elektrostatischen Abscheidung werden im Kapitel 3.1 weiter diskutiert.

2.2 Theoretische Grundlagen

2.2.1 Unipolare Partikelaufladung

Die unipolare Aufladung der Teilchen ist im Rahmen dieser Arbeit der einzige zum Einsatz kommende Mechanismus. Die typischen Mechanismen zur Partikelaufladung sind Diffusions- und Feldaufladung. Die beiden Mechanismen benötigen die Produktion von unipolaren Ionen, was in der Regel mithilfe einer Corona-Entladung erfolgt.

Feldaufladung

Die Feldaufladung erfolgt durch Ionen, die sich unter der Wirkung des starken elektrischen Feldes in Richtung Niederschlagselektrode bewegen und auf die Partikel auftreffen. Wenn ein Partikel sich im elektrischen Feld befindet wird dieses in Abhängigkeit von der relativen Dielektrizitätskonstante ε_p und der Ladung $q_p = n \cdot e$ des Partikels verformt (Abbildung 2-3).

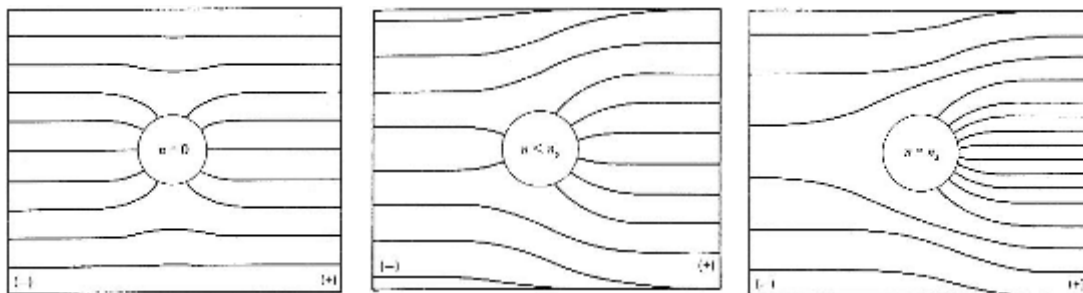


Abbildung 2-3 Leitfähiges Teilchen im uniformen Feld (Quelle der negativen Ionen links). Ein ungeladenes Teilchen (links), ein zum Teil geladenes Teilchen (Mitte) und ein Teilchen im Sättigungsladungszustand werden dargestellt [Hin99]

Die Feldstärke auf der Oberfläche eines sphärischen Teilchens wird nach Pauthenier mit folgender Gleichung beschrieben [Pau32]:

$$\vec{E} = \vec{E}_a \cdot \cos(\theta) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_a)}{\varepsilon_p + 2 \cdot \varepsilon_a} \right) - \frac{q_p}{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2} \quad 2-1$$

Mit d_p -Teilchendurchmesser [m], E_a -äußeren Feldstärke [V/m], θ -Winkel, ε_a - Dielektrizitätskonstante des Mediums.

Wenn das Teilchen seine maximale Ladung erreicht hat, treffen keine Feldlinien auf das Teilchen und $\vec{E}(\theta = 0)$ ist gleich null. Demzufolge kann die Feldaufladungsgrenze als

$$q_{p,\max} = \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot \vec{E}_a \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_a)}{\varepsilon_p + 2 \cdot \varepsilon_a} \right) \quad 2-2$$

berechnet werden.

Die Partikelaufladung als Funktion der Zeit lässt sich als

$$q_p(t) = q_{p,\max} \cdot \frac{t}{t + \tau_Q} \quad 2-3$$

beschreiben [Rob71]. Dabei ist $\tau_Q = 4 \cdot \varepsilon_0 / (\rho_i \cdot Z_i)$ - eine Zeitkonstante, Z_i - elektrische Beweglichkeit von Ionen (ca. 0,00015 m²/V·s nach [Hin99]) und ρ_i - Ionenraumladungsdichte [1/m³].

Die zeitabhängige Ladung des Teilchens ergibt sich damit als

$$n(t) = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot \vec{E}_a}{e} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot (\varepsilon_p - \varepsilon_a)}{\varepsilon_p + 2 \cdot \varepsilon_a} \right) \cdot \frac{t}{t + \frac{4 \cdot \varepsilon_0}{\rho_i \cdot Z_i}} \quad 2-4$$

Diffusionsaufladung

Die Partikelaufladung mit Ionenstrom im elektrischen Feld wird weniger effektiv mit der Verringerung des Teilchendurchmessers. Infolge ihrer thermischen Bewegung treffen im Gas vorhandene Ionen auf die Partikel. Solange die thermische Energie der Ionen ausreicht um die abstoßenden Kräfte zwischen dem geladenen Partikel und gleichpoligem Ion zu überwinden, findet die Diffusionsaufladung statt. Die Diffusionsaufladung ist vor allem für Partikeln unterhalb von etwa 0,2 µm von Bedeutung.

Die Berechnungsmodelle zur Diffusionsaufladung liefern gute Ergebnisse nur für bestimmte Partikelgrößen. Die Anzahl der Ladungen, die ein Teilchen während der Diffusionsaufladung erwirbt, wird nach White als:

$$n(t) = \frac{d_p \cdot k \cdot T}{2 \cdot K_E \cdot e^2} \cdot \ln \left[1 + \frac{\pi \cdot K_E \cdot d_p \cdot \bar{c}_i \cdot e^2 \cdot N_i \cdot t}{2 \cdot k \cdot T} \right] \quad 2-5$$

berechnet [Whi63]. Mit k - Boltzmann-Konstante [J/K], T - absoluter Temperatur [K], \bar{c}_i - mittlerer thermischer Geschwindigkeit der Ionen [m/s] (240 m/s bei normalen Bedingungen [Hin99]), N_i - Konzentration der Ionen [1/m³], $K_E = (4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0)^{-1} = 9 \cdot 10^9$ [Nm²/C²]. Das Modell liefert trotz vieler Vereinfachungen gute Ergebnisse für Teilchen größer 50 nm.

Die thermische Ionen-Geschwindigkeit findet man als [Ada84]

$$\bar{c}_i = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot \frac{M_i}{N_a}}}, \quad 2-6$$

mit M_i - molarer Ionenmasse [kg/mol] und N_a - Avogadro-Konstante [1/mol].

Das Modell von Arend und Kallmann beschreibt die Laderate eines Teilchens:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N_i \cdot Z_i \cdot e}{\varepsilon_0} \cdot \frac{n}{\exp\left(\frac{n \cdot e^2}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p \cdot k \cdot T}\right) - 1}. \quad 2-7$$

Das Modell lässt sich nur numerisch lösen, liefert aber, insbesondere im Partikelbereich unter 100 nm, viel bessere Ergebnisse, als das Modell von White, und wird für die Beschreibung des Diffusionsanteils im Modell von Lawless für die kombinierte Aufladung verwendet. Ein hervorragender Überblick über verbesserte Theorien zur Beschreibung der Diffusionsaufladung findet sich in [Sto06].

Kombinierte Aufladung nach Lawless

Die Feldaufladung ist der überwiegende Mechanismus für Partikeln größer 1 µm und die Diffusionsaufladung für Partikeln kleiner 0,1 µm. Zwischen diesen Größen kommen die beiden Mechanismen zum Einsatz. In diesem Bereich ergibt sich ein Minimum der elektrischen Mobilität (Kapitel 2.2.4).

Lawless [Law96] entwickelte unter Verwendung von drei dimensionslosen Größen ein Modell der feldunterstützten Diffusionsaufladung.

Dimensionslose Ladung:

$$\nu = \frac{n \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p \cdot k \cdot T}. \quad 2-8$$

Dimensionsloses Feld:

$$\omega = \frac{d_p \cdot E_a \cdot e}{2 \cdot k \cdot T} \quad 2-9$$

Dimensionslose Zeit:

$$\tau = \frac{N_i \cdot e \cdot Z_i \cdot t}{\varepsilon_0} \quad 2-10$$

Das klassische Kontinuum-Diffusionsaufladungsmodell ergibt sich in der dimensionsloser Darstellung als:

$$\frac{d\nu}{d\tau} = Be(\nu) = \frac{\nu}{\exp(\nu) - 1} \quad 2-11$$

Mit $Be(v)$ - Bernoulli-Funktion.

Die Berechnung der Felddaufladung nach Pauthenier folgt:

$$F(v, \omega) = \frac{dv}{d\tau} = \begin{cases} (3/4) \cdot \omega \cdot (1 - (v/(3\omega)))^2 & -3\omega \leq v \leq 3\omega \\ 0 & \text{für } v > 3\omega \\ -v & v < -3\omega \end{cases} \quad 2-12$$

Für $v = 0$ wird die Teilchenoberfläche, die dem Diffusionsstrom zur Verfügung steht, mit

$$f(\omega) = \begin{cases} (\omega + 0,475)^{-0,575} & \text{für } \omega \geq 0,525 \\ 1 & \omega < 0,525 \end{cases} \quad 2-13$$

beschrieben.

Somit ergibt sich die Laderate für elektrisch leitfähige Partikeln nach dem Lawless-Modell als:

$$F(v, \omega) = \frac{dv}{d\tau} = \begin{cases} F(v, \omega) + f(\omega) \cdot Be(0) & -3\omega \leq v \leq 3\omega \\ f(\omega) \cdot Be \cdot (v - 3\omega) & \text{für } v > 3\omega \\ -v + f(\omega) \cdot Be \cdot (-v - 3\omega) & v < -3\omega \end{cases} \quad 2-14$$

Im Fall der dielektrischen Teilchen wird der Term 3ω durch $\left(1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}\right) \cdot \omega$ ersetzt.

2.2.2 Corona-Entladung

Die beschriebenen Feld- und Diffusionsaufladungsmechanismen benötigen hohe Konzentrationen von unipolaren Ionen, die im Elektroabscheider mithilfe einer Corona-Entladung hergestellt werden.

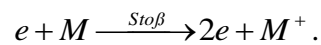
Die Herstellung der Corona-Entladung ist auf die Anwesenheit eines starken inhomogenen elektrischen Feldes angewiesen. Solche Felder werden in den Elektroabscheidern mittels spezieller Elektrodenanordnungen (Spitze-Platte, Draht-Platte oder Draht-Rohr u. a.) hergestellt.

Wird an den Draht (oder Spitze) eine Spannung angelegt, so entsteht zwischen dem Draht und dem Rohr ein stark heterogenes elektrisches Feld, wobei die höchsten Feldstärken auf der Drahtoberfläche auftreten (der Draht wird zur sogenannten aktiven Elektrode, oder Sprüh-elektrode). Ab einer bestimmten Feldstärke (Corona-Einsatzfeldstärke) kommt es zur lokalen Ionisation des Gases, die man als Corona-Entladung bezeichnet. Steigt die Spannung weiter, so kommt es zu einem Überschlag. Für die Anwendung in Elektroabscheidern ist der Bereich zwischen der Einsatzspannung und Überschlagsspannung von Interesse, da die Vorausschätzung dieser beiden Parameter für die Elektrofilterauslegung notwendig ist.

Positive Corona-Entladung

Die positive Corona-Entladung wird erzeugt, wenn die aktive Elektrode auf positive Hochspannung gelegt wird und die passive Elektrode geerdet wird (eine gleichwertige Anordnung ist die Erdung der aktiven Elektrode mit der negativen Hochspannung an der passiven

Elektrode). Die im Gas vorhandenen Elektronen werden zur aktiven Elektrode hin beschleunigt und erzeugen durch Stoßionisation positive Ionen und eine Elektronenlawine, die sich in Richtung aktive Elektrode bewegt:



Die gebildeten positiven Ionen wandern in Richtung Niederschlagselektrode und dienen zur Partikelaufladung (Abbildung 2-4).

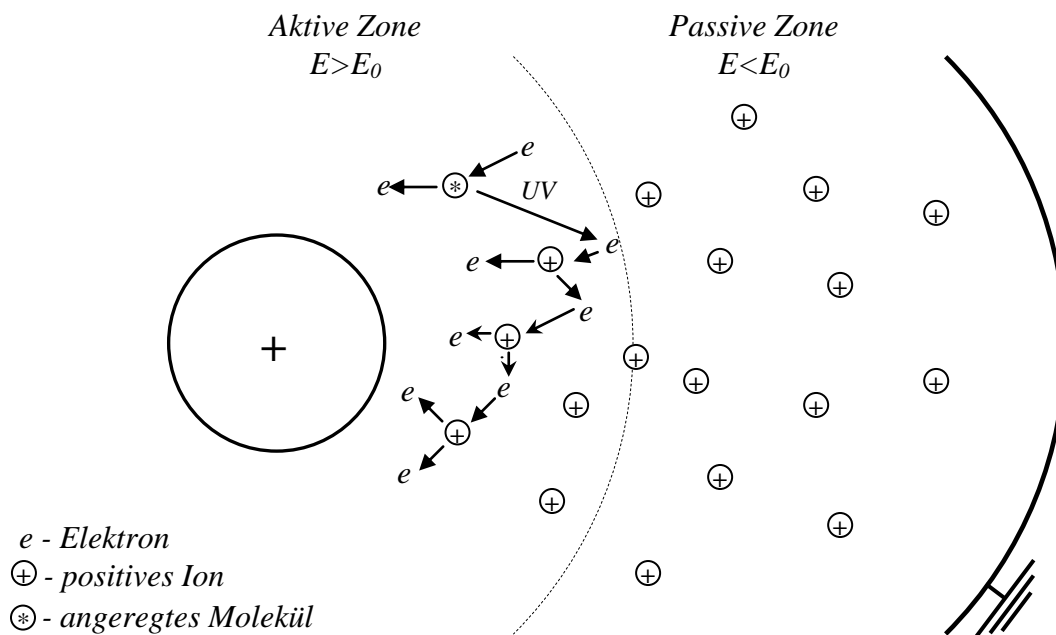


Abbildung 2-4 Positive Corona-Entladung

Nur in der unmittelbaren Umgebung der aktiven Elektrode ist die Feldstärke hoch genug, um die Elektronen auf die Ionisationsenergie zu beschleunigen. Diesen Bereich nennt man aktive Corona-Zone, und er beschränkt sich auf eine sehr dünne Schicht um die aktive Elektrode. An die aktive Zone schließt sich die passive Zone an, wo nur der Ionentransport im elektrischen Feld stattfindet. Die passive Zone füllt unter normalen Bedingungen praktisch den gesamten Raum zwischen Sprühelektrode und Niederschlagselektrode. Die Partikelaufladung und Abscheidung finden hier statt.

Es wird zwischen elastischen und unelastischen Stößen von Elektronen und Gasmolekülen unterschieden. Die elastischen Kollisionen verursachen eine Impulsänderung des Elektrons, die unelastischen führen zur Übertragung der kinetischen Energie auf Gasmoleküle. Dadurch können Moleküle angeregt oder ionisiert werden. Die Anzahl von ionisierenden Stößen pro Zentimeter Driftweg des Elektrons bezeichnet man als Ionisationskoeffizient α_T [1/cm]. Der Ionisationskoeffizient kann in Abhängigkeit von Druck und Feldstärke mit folgender empirischen Gleichung nach Townsend [Nai95] bestimmt werden:

$$\alpha_T = A_T \cdot p \cdot \exp(-B_T \cdot p / E). \quad 2-15$$

Für Luft findet man $A_T = 15$ [cm⁻¹Torr⁻¹] und $B_T = 365$ [Vcm⁻¹Torr⁻¹] mit Gültigkeit im Bereich $100 < E / p$ [Vcm⁻¹Torr⁻¹] < 800.

Die unelastischen Elektron-Molekül-Stöße können auch zur Anlagerung des Elektrons an ein Molekül führen. Der Ionenanlagerungskoeffizient β_T [1/cm] bezeichnet, analog zum Ionisationskoeffizienten, die Anzahl der Stöße pro Zentimeter Driftweg, die zur Bildung eines Ions und zum Verlust des Elektrons führen. Bei sehr hohen elektrischen Feldstärken an der Drahtoberfläche wird der Ionisationskoeffizient α_T [1/cm] größer als der Ionenanlagerungskoeffizient β_T [1/cm]. Die Ionisation des Gases findet statt und eine Elektronenlawine entsteht. Die Zunahme der Elektronenzahl N_e über die Lauflänge einer Elektronenlawine ist nach [Rai91]:

$$\frac{dN_e}{dx} = (\alpha_T - \beta_T) \cdot N_e . \quad 2-16$$

Die während der Ionisation entstandenen positiven Ionen besitzen nicht genug Energie um weitere Ionisationsvorgänge zu initiieren. Die neuen Primärelektronen für weitere Elektronenlawinen entstehen im Gas hauptsächlich durch den Photoeffekt (UV-Licht, das von hochangeregten Molekülen emittiert wird) [Cha95].

Genauso wie ein angeregtes Molekül Strahlung emittiert, kann ein Molekül durch UV-Licht angeregt werden: $h\nu + M \leftrightarrow M^*$.

Die Photoionisation findet statt, wenn

$$\lambda_w \leq c_L \frac{h_p}{E_i} \quad 2-17$$

ist [Nai95]. Mit c_L - Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [m/s], h_p - Planck-Konstante [J·s], λ_w - Wellenlänge der Strahlung [m] und E_i - Ionisationsenergie [J]. Je höher die Ionisationsenergie ist, desto kürzer soll die Wellenlänge der für die Ionisation notwendigen Strahlung sein.

Der Einsatz der positiven Corona-Entladung wird von „pre-onset“ Entladungsarten wie Burst-Pulse und Geiger-Pulse begleitet [Ami53].

Negative Corona-Entladung

Der Entladungsvorgang ist grundsätzlich analog zur positiven Corona-Entladung. Im Fall der negativen Corona-Entladung werden zufällig im Gas vorhandene Elektronen stark zur Niederschlagselektrode hin beschleunigt. Die beschleunigten Elektronen stoßen mit neutralen Gasmolekülen und schlagen ein weiteres Elektron aus, sodass sich zwei Elektronen und ein positives Ion bilden (analog zur positiven Corona-Entladung). Die Elektronenlawine entsteht. Die gebildeten positiven Gasionen wandern zur aktiven Elektrode und können dort beim Aufschlag freie Elektronen erzeugen. Allerdings ist die Menge der auf diese Weise erzeugten Elektronen vernachlässigbar klein im Vergleich zu denen, die durch den Fotoeffekt erzeugt wurden. Die freigesetzten Elektronen werden in der passiven Zone von elektronegativen Gasmolekülen (z. B. SO_2 , O_2 , H_2O , CO_2) eingefangen und bilden negative Ionen, die sich Richtung passiver Elektrode bewegen (Abbildung 2-5).

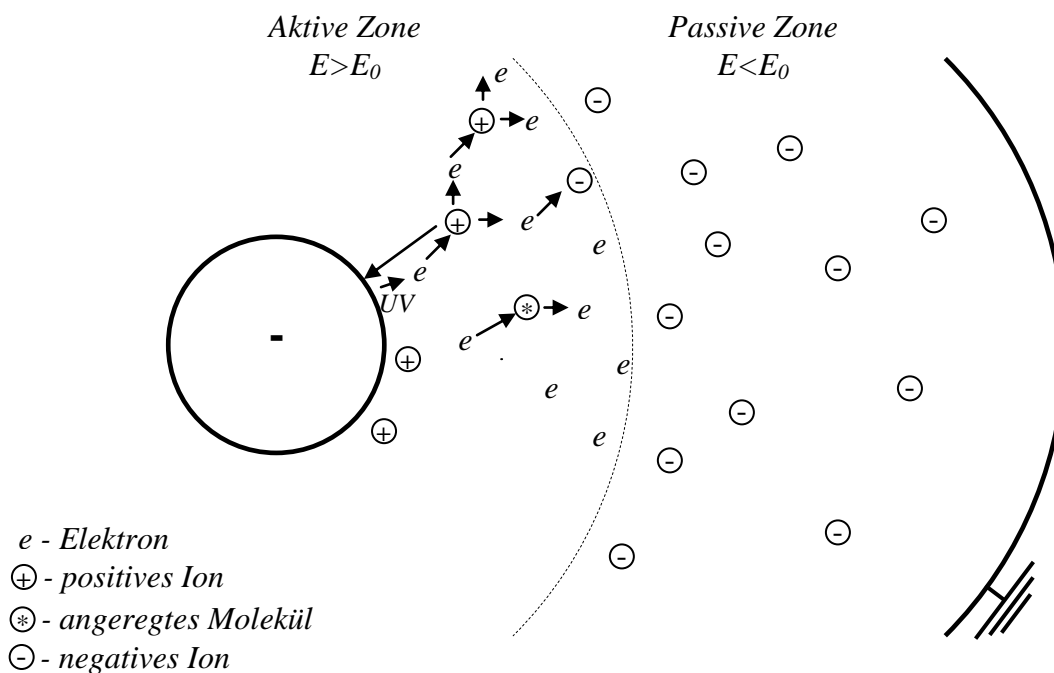


Abbildung 2-5 Negative Corona-Entladung

Die negative Corona-Entladung wird auch durch mehrere Entladungsarten, wie z.B. Trichel-Pulse, gekennzeichnet. Ausführliche Informationen dazu sind in [Loe60, Lam73, Cha95] zu finden.

Die elektrische Beweglichkeit der negativen Ionen ist mit $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ höher als die der positiven Luftionen, die bei $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ liegt. Zum Vergleich ist die elektrische Mobilität eines Elektrons $6,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ [Hin99].

Bei negativer Corona können höhere Spannungen (ca. doppelt so hoch als bei positiver Corona) und damit auch höhere Abscheidegrade erreicht werden. Das ist auch der Grund warum die negative Corona, wenn die Ozonproduktion keine Rolle spielt, öfter eingesetzt wird [Löf88].

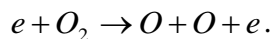
Die Corona-Entladung wird durch die Strom-Spannungs-Charakteristik charakterisiert. Weiteres hierzu im Kapitel 2.2.5.

Ozon

Eine Vielfalt an chemischen Reaktionen findet innerhalb eines ionisierten Gases statt. Diese Reaktionen beziehen atomare Spezies, radikale Spezies, komplexe molekulare Spezies, und auch Elektronen und Ionen ein [Cha95].

Ein wichtiges Beiprodukt der Corona-Entladung ist Ozon. Ozon ist eins der stärksten Oxidationsmittel. Ozon kann viele gesundheitliche Probleme wie Verschärfung von Asthma, Reizung der Atemwege, Husten, Brustschmerzen, Atemwegserkrankungen und sogar Lungenkrebs hervorrufen [Yu11, Che09, Boe97].

Die ersten Untersuchungen zur Ozongeneration in einer Corona-Entladung wurden von Devins im Sauerstoff durchgeführt. Die Hauptquelle des atomaren Sauerstoffes ist die Dissoziation von O_2 -Molekülen durch den Einschlag von Elektronen [Dev56]:



Die weitere Reaktion zwischen O , O_2 und einem Molekül führt zur Bildung von Ozon:



Für die Luft gilt $M = O$, O_2 oder N_2 [Yeh07].

Yagi [Yag79] fand, dass die Stickstoffoxide (NO , NO_2 , NO_3 und N_2O_5), die in der Corona-Entladung gebildet werden, eine große Rolle in der Produktion von Ozon spielen und zur Zerstörung von O_3 führen:



Auch die Reaktionen mit angeregten Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen N_2^* , O_2^* sind von großer Bedeutung [Che03]:



Auf diese Weise werden bis zu 80% von der gesamten Ozonmenge in einer positiven Corona-Entladung und bis zu 90% in einer negativen Corona-Entladung gebildet [Che03].

Mehrere Autoren haben einen linearen Anstieg der Ozonkonzentration mit steigendem Stromfluss beobachtet [Pon97, Hau86, Yag79]. Mit steigendem Corona-Strom wird die Temperatur des Gases im Plasma erhöht und nur ein Teil der Sauerstoffatome reagiert zum Ozon. Der Rest von Sauerstoffatomen nimmt an der Ozonzerstörung teil oder rekombiniert zum Sauerstoffmolekül [Yag79, Yeh07]:



Im Hinblick darauf hat es einige Untersuchungen gegeben, die als Ziel die Ozonreduzierung mit Hilfe beheizter Elektroden hatten [Awa75, Lia08, Liu00]. Allerdings sind die dazu benötigten Elektrodentemperaturen (100-500° C) sehr hoch, was die Wirtschaftlichkeit dieser Methode verschlechtert.

Ein weiterer Dissoziationsmechanismus von Ozon erfolgt unter Anwesenheit von Wasserdampf. Dabei entsteht ein sehr reaktives OH^* -Radikal [Boe97]:





Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass bei der negativen Corona-Entladung fünf- bis neunmal mehr Ozon gebildet wird als bei positiver Corona. Dies ist auf die höhere Elektronenmenge zurückzuführen, die zur Bildung vom atomaren Sauerstoff dient (Reaktion 2-18) [Awa75, Boe97]. Die Vergrößerung der Elektrodenoberfläche und damit verbundene Erweiterung vom Plasma führt auch zur Steigung der Ozonproduktion [Che02].

Eine Reihe von Untersuchungen zur Modellierung der Ozonproduktion wurde in den letzten Jahren durchgeführt. Wang [Wan09] simulierte den Einfluss von der Elektrodengeometrie auf die Ozonbildung. Yu [Yu11] entwickelte ein Modell der Ozongeneration unter Berücksichtigung von den Adsorptions- und Desorptionsraten des Ozons durch die Kammerwände. Ein numerisches Modell zur Ozongeneration in der positiven Corona-Entladung wurde von Davidson in [Che02] vorgeschlagen.

Im Bereich Klimatechnik wird meistens positive Corona-Entladung eingesetzt. Ozon, das während der negativen Entladung entsteht, stört typischerweise bei der Reinigung von Industrieabgasen nicht [Löf88]. Ein ozonfreier, Elektrospray-basierter Elektroabscheider wurde von Tepper in [Tep07, Tep08] entwickelt und untersucht.

2.2.3 Elektrischer Wind

Durch die Bewegung der während der Corona-Entladung entstandenen Ionen wird eine Strömung verursacht, der sog. „elektrischer Wind“. Dieses Phänomen ist für den gesamten Prozess der elektrostatischen Abscheidung von großer Bedeutung. Die dabei gebildete elektrohydrodynamische Strömung kann einerseits den abgeschiedenen Staub von der Niederschlagsselektrode ablösen, was zur Verschlechterung des Abscheidegrades führt. Andererseits wird dadurch die Strömung des Gases besser verteilt, und Wärmetransport und Stoffaustausch werden deutlich verbessert [Mni09].

Bei den nicht axial-symmetrischen Corona-Elektrodenanordnungen (z. B. Platten-Elektroabscheider) tritt eine EHD-Strömung immer auf [Ada73]. Im Fall eines symmetrischen Elektroden-Systems (Draht-Rohr-Elektroabscheider) werden die Druckkräfte gleich über den Umfang verteilt und es wird keine Strömung gebildet. Es können jedoch wegen der am Draht auftretenden hohen Raumladungsdichten die Strömungs-Instabilitäten auftreten [Tur69].

Ab einer axialen Geschwindigkeit von über 1 m/s wird der Einfluss des elektrischen Windes gering. In der vorliegenden Arbeit wird mit Auflader-Konstruktionen gearbeitet, die mit sehr hohen Gasgeschwindigkeiten durchströmt werden (5-10 m/s).

2.2.4 Grundlagen der elektrostatischen Abscheidung

Bewegung submikroner Partikeln im elektrischen Feld

Das Abscheiden von Teilchen im Elektroabscheider beruht auf der elektrischen Kraftwirkung auf die einzelnen Teilchen. Befindet sich ein Partikel mit n Elementarladungen in einem elektrischen Feld E [V/m], so wirkt auf das Teilchen eine Kraft

$$F_E = E \cdot n \cdot e. \quad 2-32$$

Die aus dieser Kraft resultierende Partikelgeschwindigkeit wird als

$$W_{sed} = n \cdot e \cdot E \cdot B = \frac{n \cdot e \cdot Cu \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \quad 2-33$$

berechnet. Mit B [$\text{m} \cdot (\text{N} \cdot \text{s})^{-1}$]- mechanischen Beweglichkeit des Teilchens, Cu -Cunningham Korrektur, η - dynamische Viskosität des Gases [Ns/m^2]. Die Cunningham-Korrektur ermöglicht die Verwendung der Gleichung für sehr kleine Partikeln, die mit der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle vergleichbare Größe haben. Man findet

$$Cu = 1 + \frac{2,52 \cdot \lambda}{d_p} \quad 2-34$$

mit λ - mittlerer freien Weglänge.

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n_m \cdot \pi \cdot d_K^2}, \quad 2-35$$

mit n_m - Konzentration von Molekülen [$1/\text{m}^3$]; d_K -Kollisionsdurchmesser [m] (für Luft $3,7 \cdot 10^{-10}$ m). Die mittlere freie Weglänge für Luft bei 101 kPa und 293 K beträgt 0,066 μm . Die mittlere freie Weglänge kann an die thermodynamischen Zustände angepasst werden [Wil76]:

$$\lambda(T, p) = \lambda(T_0, p_0) \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{1 + \frac{S_s}{T_0}}{1 + \frac{S_s}{T}}, \quad 2-36$$

mit S_s - Sutherland Konstante [K]. Für die Luft beträgt S_s 110 K.

Nach Allen und Raabe wird die Cunningham Korrektur für Teilchen kleiner 0,1 μm als:

$$Cu = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \cdot \left(2,34 + 1,05 \cdot \exp\left(-0,39 \cdot \frac{d_p}{\lambda}\right) \right) \quad 2-37$$

berechnet [Hin99].

Für die Beschreibung der Partikelbewegung im elektrischen Feld wird der Term elektrische Mobilität benutzt:

$$Z_p = n \cdot e \cdot B = \frac{n \cdot e \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \quad 2-38$$

Somit ist

$$W_{sed} = Z_p \cdot E. \quad 2-39$$

Die Abbildung 2-6 zeigt exemplarisch die elektrische Mobilität des Teilchens in der Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser, gerechnet für die typischen Aufladebedingungen: $E=0,5 \text{ MV/m}$, $N_i \cdot t=10^{13} \text{ [s/m}^3\text{]}$ [Hin99]. Bei etwa $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ befindet sich ein Minimum der elektrischen Mobilität. Das theoretisch vorhergesagte Mobilitätsminimum wird auch mess-technisch als Minimum des Fraktionsabscheidegrades nachgewiesen [May85].

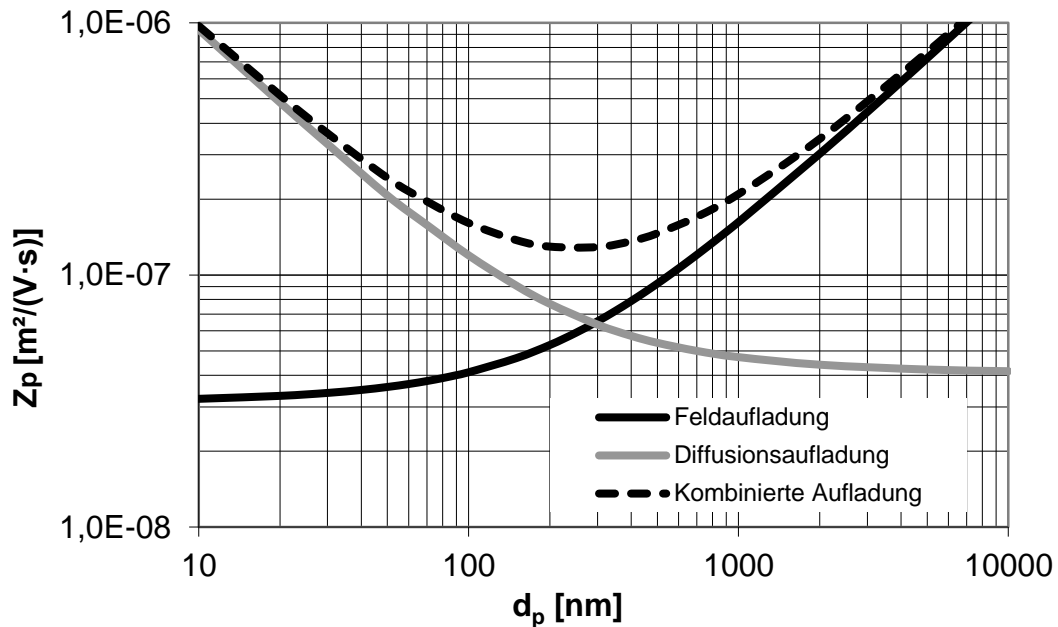


Abbildung 2-6 Elektrische Mobilität als Funktion der Partikelgröße für Diffusions-, Feld- und kombinierte Aufladung. Berechnet für $E=500 \text{ kV/m}$; $N_i \cdot t=10^{13} \text{ s/m}^3$ und $\epsilon_r=3$ [Hin99]

Analytische Berechnung der Abscheideeffizienz: Deutsch-Gleichung

Die Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades eines Elektrofilters kann analytisch mithilfe der Deutsch-Anderson-Gleichung erfolgen:

$$\eta_T = 1 - \exp\left(-\frac{A \cdot W_{sed}}{\dot{V}}\right), \quad 2-40$$

mit A - Niederschlagselektrodenfläche $[\text{m}^2]$, \dot{V} - Volumenstrom $[\text{m}^3/\text{s}]$ und W_{sed} - Wanderungsgeschwindigkeit des Teilchens $[\text{m/s}]$ an der Niederschlagselektrode. Diese

Formel wurde bereits in 1922 von Deutsch [Deu22] für eine ideal vermischte Strömung hergeleitet.

Unbekannt dabei ist die Wanderungsgeschwindigkeit des Teilchens, die von der Teilchengröße d_p [m], Ladungsmenge n und der Feldstärke an der Niederschlagselektrode E_{NE} [V/m] abhängig ist (Gleich. 2-38 und 2-39). In der Realität ist sie also vom vorgeschalteten Prozess, Partikelgrößenverteilung, Staubwiderstand, u. a. abhängig.

Die effektive Wanderungsgeschwindigkeit wird üblicherweise aus den Abscheidegradmessungen mit der Gleichung 2-33 ermittelt, dabei wird die mittlere Feldstärke eingesetzt [Mil93, Pot75, Wad97, May85]:

$$W_{sed} = \frac{n \cdot e \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \cdot E_{mittel} = \frac{n \cdot e \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \cdot \frac{\Delta U}{d}. \quad 2-41$$

In der Literatur sind mehrere Vergleiche zwischen den gemessenen und nach Deutsch gerechneten Abscheidegraden zu finden. In der Regel wird eine deutlich bessere Abscheidung gemessen. So zeigte Wadenpohl in seinen Untersuchungen für den Partikelgrößenbereich von 0,01 bis 10 μm eine deutlich bessere Abscheidung als nach der Deutsch-Gleichung und für die laminare Strömung berechnet, und führte diesen Unterschied auf den elektrischen Wind und eine höhere, als nach Cochet berechnet, Partikelladung zurück [Wad97].

Die typischen Probleme der Validierung von Deutsch-Gleichung sind die meistens ungleichmäßige Gasverteilung, Asymmetrien im Aufbau (Draht-Platte-Aufbau u.a.) und ungenügende Elektrodenreinigung.

2.2.5 I-U-Charakteristik eines partikelfreien Elektroabscheiders

Eine Corona-Entladung wird durch ihre Strom-Spannungs-Charakteristik charakterisiert. Für eine einfache Elektrodenanordnung (Draht-Rohr) gibt es anwendbare Methoden zur Berechnung der I-U-Charakteristik. Für eine komplexe Elektroden-Geometrie kann sie experimentell bestimmt werden.

Die Einsatzfeldstärke der Corona-Entladung wird mit der empirischen Gleichung von Peek für einen glatten Draht ermittelt [Whi63]:

$$\vec{E} = A_1 \cdot \delta_r + A_2 \cdot \sqrt{\frac{\delta_r}{r_D}}, \quad 2-42$$

mit der relativen Dichte des Gases:

$$\delta_r = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}. \quad 2-43$$

Die Konstanten $A_1 = 3,2 \cdot 10^6$ [Vm⁻¹] und $A_2 = 9 \cdot 10^4$ [Vm^{-0,5}] dienen zur Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften der aktiven Elektrode und der Gaszusammensetzung. Die Gleichung von Peek wird üblicherweise für relativ dicke aktive Elektroden verwendet. Für kleinere Elektrodenradien und positive Corona wird ein Gleichungssystem von Rouse angewendet [Clo94]:

$$E_E = 3 \cdot 10^6 + \frac{9 \cdot 10^4}{\sqrt{r_D}} \quad r_D > 100 \mu m, \quad 2-44$$

$$E_E = 6,27 \cdot 10^6 + \frac{1,74 \cdot 10^5}{(100 \cdot r_D)^{0,75}} \quad 15 \mu m < r_D < 100 \mu m. \quad 2-45$$

Das elektrische Feld im Elektroabscheider ist stark inhomogen. Unterhalb der Einsatzspannung wird die Feldstärke nur durch die Oberflächenladung der Sprühelektrode gebildet und kann für $r > r_D$ und $U < U_E$ nach dem Satz von Gauß als

$$E_E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} \quad 2-46$$

berechnet werden. Mit r_D - Drahtradius [m], r_R - Rohrradius [m].

Wird die Einsatzspannung erreicht, so kommt es zur Ionisation des Gases in der Nähe der Sprühelektrode und zur Produktion der Ladungsträger. Die Ladungsträger stellen ihrerseits auch ein Feld her. Für einen partikelfreien Elektroabscheider gilt dann:

$$E(r) = E_E(r) + E_i(r). \quad 2-47$$

Wird der Ionenstrom in Form der Kontinuitätsgleichung als

$$I = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot Z_i \cdot \rho_i(r) \cdot E(r) = konst. \quad 2-48$$

und das Ionenraumladungsfeld als

$$E_i(r) = \frac{1}{r \cdot \epsilon_0} \cdot \int_{r_D}^{r_R} r \cdot \rho_i(r) dr \quad 2-49$$

dargestellt, so ergibt sich die Gleichung 2-48 zu

$$I = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot Z_i \cdot \rho_i(r) \cdot \left(\frac{U_E}{r \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + \frac{1}{r \cdot \epsilon_0} \cdot \int_{r_D}^{r_R} r \cdot \rho_i(r) dr \right), \quad 2-50$$

mit L - Länge der Sprühelektrode [m], ρ_i - Ionenraumladungsdichte [C/m³], U_E - Einsatzspannung [V] [Lüb11].

Die Ionenraumladungsdichte findet man durch die Ableitung nach r :

$$\rho_i(r) = \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\varepsilon_0 \cdot I} \cdot (r^2 - r_D^2) + \frac{(2 \cdot \pi \cdot Z_i \cdot U_E \cdot L)^2}{\left(I \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)\right)^2}}}. \quad 2-51$$

Damit wird der Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Abhängigkeit vom Koronastrom als

$$E(r) = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot Z_i} \cdot (r^2 - r_D^2) + \frac{(U_E)^2}{\left(\ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)\right)^2}}. \quad 2-52$$

gefunden.

Für einen partikelfreien Rohr-Draht-Elektroabscheider kann die zum Strom gehörende Spannung als

$$U = \frac{U_E}{\ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} \left[\sqrt{1 + I \cdot c \cdot (r_R^2 - r_D^2)} - 1 + \sqrt{1 - I \cdot c \cdot r_D^2} \left(\ln \left| \frac{r_R}{r_D} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 - I \cdot c \cdot r_D^2}}{\sqrt{1 + I \cdot c \cdot (r_R^2 - r_D^2)} + \sqrt{1 - I \cdot c \cdot r_D^2}} \right| \right) \right]$$

$$\text{mit } c = \frac{\ln^2\left(\frac{r_R}{r_D}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot Z_i \cdot U_E^2} \quad 2-53$$

gefunden werden [Lüb11].

Ein Beispiel der Berechnung befindet sich in der Abbildung 2-7. Es ist ersichtlich, dass für eine Draht-Rohr-Geometrie und positive Corona eine sehr gute Übereinstimmung der gerechneten und gemessenen Stromwerte vorliegt. Im Fall der negativen Corona ist eine starke Abweichung der Messwerte im Bereich kleiner Ströme zu sehen. Dieses Verhalten ist auf den Einfluss der thermoionischen Feldemission zurückzuführen [Ree97].

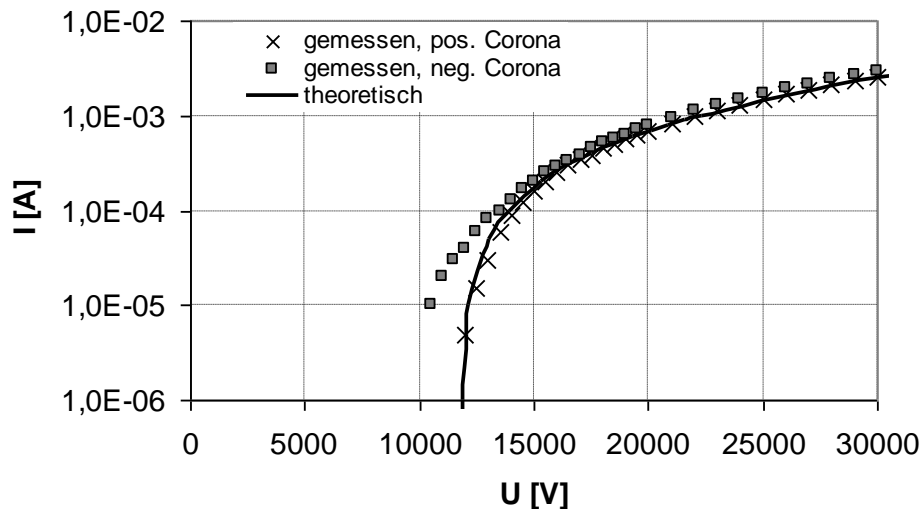


Abbildung 2-7 Gemessene und berechnete I-U Charakteristika. Drahtradius 0,25 mm; Rohrradius 7,5 cm; Drahtlänge 2,6 m; Einsatzspannung 11,9 kV. Theoretische Kurven berechnet mit $Z_i = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$

2.2.6 Elektrischer Überschlag im Elektroabscheider

Die maximale Betriebsspannung und somit die Abscheideleistung eines Elektroabscheiders wird durch die Überschlagsspannung begrenzt. Der elektrische Durchbruch wird durch einen Lichtbogen gekennzeichnet. Dabei fließt ein sehr hoher Strom bei niedriger Spannung und der Elektroabscheider ist wirkungslos. Allgemein werden die elektrischen Überschlüge in einem Elektroabscheider zugelassen und ihre Häufigkeit wird oft als Steuerparameter kontrolliert, sie sind aber unerwünscht.

Es existieren zwar Theorien zur Beschreibung des elektrischen Überschlags in einer partikel-freien Elektrodenanordnung (Theorie von Townsend für kleine und die Streamer-Theorie für hohe $p \cdot d$ - Produkte [Loe61, Mee53, Nai95]), doch sind diese in einem realen Elektroabscheider kaum anwendbar.

Generell wird durch die Anwesenheit von Teilchen im Elektrodenzwischenraum die Durchbruchfeldstärke reduziert. Dabei beeinflussen die leitfähigen Teilchen das dielektrische Verhalten der Gase stärker als die nicht leitfähigen. Die Teilchenform ist dabei auch ein wichtiger Faktor [Lag81, Das96, Das00]. Die leitfähigen Teilchen können Mikroentladungen erzeugen und dadurch Streamer bilden, die ihrerseits zum Überschlag führen. Die Möglichkeiten eines partikelinitiierten elektrischen Durchschlags in einer Corona-Anordnung werden in [Das96] diskutiert. Die obenerwähnten Untersuchungen beziehen sich auf Teilchen größer 100 μm . Kleine Teilchen ($<1 \mu\text{m}$), zumindest in kleinen Mengen $<100 \text{ mg/m}^3$, scheinen keinen großen Einfluss auf die Durchbruchfeldstärke zu haben [Quelle8 aus Lag81]. Bei großen Mengen ($>100 \text{ mg/m}^3$) wird auch bei der Anwesenheit von kleinen Partikeln die Reduzierung der Durchschlagsfestigkeit beobachtet [Quelle12 aus Lag81].

Die Durchschlagfestigkeit von Luft hängt auch maßgeblich von der Rauigkeit der Elektrodenoberfläche ab. An den mikroskopischen Unebenheiten der Oberfläche können sich Teilchen anlagern und im Feld Partikel-Ketten bilden, was auch zum drastischen Abfall der

Durchbruchsfeldstärke führt. Die Durchschlagfestigkeit nimmt mit der Anzahl von Partikeln in der Kette ab. Numerische Berechnungen dazu sind in [Das00] zu finden.

Die Überschlagsfeldstärke unterliegt einem deutlichen Polaritätseinfluss. In der Regel wird eine doppelt so hohe Überschlagsspannung bei negativer Polarität der Corona-Entladung beobachtet [Bur35, Das96, Nai95]. Das ist auch der Grund warum in den Fällen, in denen die Ozonproduktion keine Rolle spielt, die negative Corona eingesetzt wird.

In der Literatur sind verschiedene Angaben zu den mittleren Überschlagsfeldstärken zu finden. [Han69] nahm in seinen Untersuchungen eine Überschlagsfeldstärke von 20 kV/cm an. Bei großem Abstand (3,5 - 12 cm) im homogenen E-Feld wurde von [Boy66] eine Überschlagsfeldstärke von ca. 2,8 MV/m gemessen. Anhand der Ergebnisse von [Bou93, Whi63] kann für eine Spitze-Platte Anordnung eine mittlere Feldstärke von 0,5 MV/m festgestellt werden, die für beide Polaritäten als quasi überschlagsfrei angenommen werden kann. Im Fall eines mit Teilchen beladenen Abscheiders wird eine starke Erhöhung der Feldstärke an der Niederschlagselektrode durch die partikelgebundene Raumladung bedingt. Das kann auch zu einem Überschlag führen, der von der Niederschlagselektrode initiiert wird. Lübbert nahm in seiner Arbeit eine mittlere Feldstärke von 0,8 MV/m an [Lüb11].

2.2.7 Corona Quenching. Das Modell von Lübbert

Bei hohen Partikelkonzentrationen im Elektroabscheider kann der Corona-Strom bis auf wenige Prozent des Leerlaufstroms unterdrückt werden. Dieser Effekt wurde bereits von Deutsch in 1931 beobachtet und wird als Corona-Quenching bezeichnet. Während diesen Betriebszustandes besteht die Raumladung im Elektrodenzwischenraum praktisch nur aus geladenen Partikeln. Die Partikelaufladung durch Ionen ist dabei sehr gering und hängt von der Partikelabscheidung ab. Mit dem Problem des Corona-Quenchings befassten sich zahlreiche Autoren in [Mat84, Mil92, Cas84]. Die von ihnen entwickelten Modelle gingen von der Annahme einer festen Raumladungsdichte aus und beinhalteten keine Teilchenladekinetik. Letztendlich führte Lübbert [Lüb11] in seiner Arbeit eine Definition des Corona-Quenching ein und entwickelte ein analytisches Berechnungsmodell für den gequenchten Elektroabscheider mit Berücksichtigung der Teilchenaufladung. Das Modell gilt bei sehr kleinen Strömen unter den Annahmen der ideal vermischten Kolbenströmung und der über den Querschnitt homogen verteilten partikelgebundenen Raumladung.

Die Feldstärke in einem mit Teilchen beladenen Draht-Rohr Elektroabscheider kann als Summe des statischen Feldes der Sprühelektrode $E_{SE} = U_0 / (r \cdot \ln(r_R / r_D))$, des Ionenraumladungsfeldes E_i und des Feldes E_p , das aus der partikelgebundenen Raumladung resultiert, vorgestellt werden:

$$E = E_{SE} + E_i + E_p. \quad 2-54$$

Für die Unterdrückung des Corona-Stroms muss die partikelgebundene Raumladung eine Potenzialdifferenz verursachen, die der Differenz zwischen der Betriebs- und Einsatzspannung entspricht. Unter der Annahme der idealen Quervermischung durch Turbulenz gilt:

$$\rho_p = c \cdot \bar{n} \cdot e = \frac{4 \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta U}{r_R^2} = konst. \quad 2-55$$

Die Ionenraumladungsdichte im gequenchten Elektroabscheider ist sehr gering und kann vernachlässigt werden. Damit ist

$$E(r) = \frac{U_E}{r \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + 2 \cdot \frac{\Delta U \cdot r}{r_R^2}. \quad 2-56$$

Für die Feldstärke an der Niederschlagselektrode gilt:

$$E_{NE} = \frac{U_E}{r_R \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + 2 \cdot \frac{\Delta U}{r_R}. \quad 2-57$$

Setzt man die Feldstärke in die Gleichung von Deutsch ein (Gleichung 2-40), so erhält man die zeitliche Änderung der Partikelkonzentration im gequenchten Abscheider:

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{8 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0 \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot r_R^4} \cdot \left(\frac{U_E}{\ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + 2 \cdot \Delta U \right) = konst. \quad 2-58$$

Unter der oben getroffenen Annahme (Gleichung 2-55) kann die Dauer des Quenching in der Abhängigkeit von der mittleren Partikelladung als

$$t(\bar{n}) = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot r_R^4 \cdot c_0 \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0}{c_0 \cdot \bar{n}(t) \cdot e \cdot r_R^2} \right) \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)}{8 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0 \cdot Cu \cdot \left(U_E + 2 \cdot \Delta U \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right) \right)} \quad 2-59$$

gefunden werden.

Für einen Plattenelektroabscheider gilt:

$$\rho_p = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta U}{h^2} = const, \quad 2-60$$

mit h - halber Gassenbreite [m].

Bei einem Sprühdraht-Sprühdraht Abstand b , der bei der Berechnung des mittleren elektrischen Feldes an der Niederschlagselektrode bei Corona-Einsatzspannung eingesetzt wird, ist die mittlere Abscheiderate eines Platten-Elektroabscheiders im gequenchten Zustand:

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{4 \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta U^2}{h^4} \cdot \left(\frac{E_E \cdot r_D \cdot \pi \cdot h}{2 \cdot \Delta U \cdot b} \right) \cdot \frac{Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p}. \quad 2-61$$

Die Quenchdauer im Plattenabscheider ergibt sich als

$$t(\bar{n}) = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p}{Cu} \cdot \frac{h^4}{4 \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta U^2} \cdot c \cdot \frac{\left(1 - \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta U}{c \cdot \bar{n} \cdot e \cdot h^2}\right)}{\left(1 + \frac{E_E \cdot r_D \cdot \pi \cdot h}{2 \cdot \Delta U \cdot b}\right)}. \quad 2-62$$

Aus diesen Gleichungen ist ersichtlich, dass das Corona-Quenchen sehr stark von der Abscheider-Geometrie abhängt. Die Quenchzeit nimmt mit vierter Potenz mit Rohrradius bzw. mit dem halben Plattenabstand zu. Die mittlere Teilchenladung ist dabei unbekannt. Da die Partikelkonzentration im gequenchten Abscheider ständig abnimmt und die damit verbundenen Ladungsverluste durch Aufladung wiedergewonnen werden, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$c \cdot \left(\frac{dn}{dt}(\bar{n})\right) + \bar{n} \cdot \left(\frac{dc}{dt}\right) = 0. \quad 2-63$$

Dabei beschreibt der linke Summand die Aufladekinetik und wird mit den Ladetheorien beschrieben. Der rechte Summand bestimmt die Abscheidekinetik von geladenen Teilchen. Zur Berechnung der Teilchenaufladung wird der Ion-Partikel-Kombinationskoeffizient [Fuc63] benutzt

$$\Lambda = \frac{1}{N_{i,\infty}} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1}{\rho_{i,\infty}} \cdot \frac{dq_p}{dt} = \frac{e}{\rho_{i,\infty}} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad 2-64$$

Hier ist $N_{i,\infty}$ und $\rho_{i,\infty}$ - Ionenkonzentration und Ionenraumladungsdichte in großer Entfernung zum Teilchen.

Die Extinktion des ionengetragenen Stroms beschreibt Lübbert [Lüb11] durch folgende Beziehung:

$$I(r_R) = I(r_D) \cdot \exp\left(-\frac{c}{Z_i} \cdot \int_{r_D}^{r_R} \frac{\Lambda}{E(r)} \cdot dr\right). \quad 2-65$$

Der Zusammenhang mit Strom und mittlerer Teilchenladung im Quenchzustand ist somit:

$$I(r_D) = \frac{\frac{8 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot n \cdot e \cdot Cu}{3 \cdot r_R^2 \cdot \eta \cdot d_p} \cdot \left(\frac{U_E}{\ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + 2 \cdot \Delta U\right)}{1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0}{n \cdot e \cdot r_R^2 \cdot Z_i} \cdot \int_{r_D}^{r_R} \frac{\Lambda}{E(r)} \cdot dr\right)}. \quad 2-66$$

Bei einem ortsunabhängigen Ion-Partikel-Kombinationskoeffizient wird die Gleichung 2-66 weiter zu

$$I(r_D) = \frac{\frac{8 \cdot \Delta U \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot n \cdot e \cdot Cu}{3 \cdot r_R \cdot \eta \cdot d_p} \cdot \left(\frac{U_E}{\ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)} + 2 \cdot \Delta U \right)}{\left(1 - \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta U \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)}{U_E} \right)^{\frac{\varepsilon_0 \cdot \Lambda}{n \cdot e \cdot Z_i}} \right)} \quad 2-67$$

vereinfacht. Bei idealer Quervermischung wird ein direkter Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Teilchenladung beobachtet [Lüb11].

Als das Ende des Corona-Quenchings wird das Erreichen von 5% des Leerlaufstroms bei der gleichen angelegten Spannung definiert [Lüb11]. Der Abscheider gilt als gequench solange:

$$I(r_D)_{\text{Quench}} \leq 0,05 \cdot I(r_D)_{\text{Leerlauf}} \text{ bei } \Delta U = \text{konst.} \quad 2-68$$

Die besonderen Aufladebedingungen während des Corona-Quenching ermöglichen eine sehr energieeffiziente Partikelaufladung. Am Ende des Quenchvorgangs werden mehr als 50% der erwarteten Teilchenmaximalladung erreicht, und das bei einem sehr geringen Stromfluss. Das macht den Betrieb der Aufladestufe eines zweistufigen Elektroabscheiders in einem Quench-Regime attraktiv. Dies wird im Kapitel 5.1 ausführlicher gezeigt und diskutiert.

Die analytische Lösung ist nur unter Annahme einer über dem Radius konstanten partikelgebundenen Raumladungsdichte und unter Vernachlässigung der Ionenraumladungsdichte möglich. Für die Beschreibung der Vorgänge während des Übergangsregimes (die Ionen- und Partikelraumladung im Elektroden-Zwischenraum sind vorhanden) ist eine numerische Lösung erforderlich. Lübbert stellte in seiner Arbeit eine eindimensionale Simulation des Rohrelektroabscheiders dar, die Effekte von Partikel- und Ladungsverteilungen, Mischverhalten, Ionenverlusten beim Durchgang durch das Aerosol miteinbezogen hat [Lüb11]. Der Programmalgorithmus (siehe Anhang 12.2) wird auf der Basis von MatLab implementiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Abläufe im Auflader nach dem Modell von Lübbert numerisch berechnet.

2.2.8 Elektrostatische Dispersion

Die Raumladung in Elektroabscheidern liegt in Form von Ionen und geladener Partikeln vor und hat einen entscheidenden Einfluss auf viele Vorgänge während des EA-Betriebs. Die Raumladung in Ionenform ist aufgrund von hoher Ionenbeweglichkeit nur im Corona-Elektroden-Zwischenraum vorhanden, sie begrenzt den Stromfluss und stabilisiert die Corona-Entladung [Whi63]. Die geladenen Teilchen sind viel langsamer als die Ionen und werden mit Gasstrom nach weit außerhalb vom Elektrodenzwischenraum getragen.

Die Feldstärke, die aus der Raumladung resultiert, wird mit dem Satz von Gauß beschrieben:

$$\int_A E dA = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho_p dV, \quad 2-69$$

mit ρ_p - Raumladungsdichte von Partikeln oder Ionen [C/m³].

Für eine Rohrgeometrie gilt:

$$E(r) = \frac{\rho_p \cdot r}{2 \cdot \varepsilon_0}. \quad 2-70$$

Die Feldstärke ist proportional zu Rohrradius, siehe Abbildung 2-8.

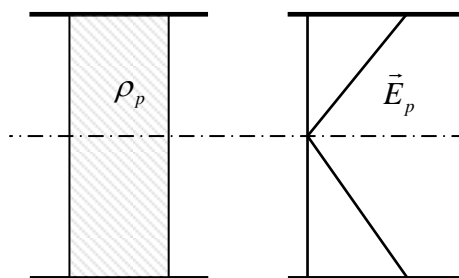


Abbildung 2-8 Die aus der partikelgebundenen Raumladung resultierende Feldstärke in einem Rohr

Eine Wolke von unipolar geladenen Teilchen hat eine Tendenz zum Ausweiten wegen der abstoßend wirkenden Kräfte zwischen diesen Teilchen. Dabei sinkt die Partikelkonzentration mit der Zeit. Für dieses Verhalten von geladenen Teilchen hat Wolodkewitsch in seinen Untersuchungen [Wol33, Wol33_2] den Begriff „elektrische Diffusion“ eingeführt. In den späteren Veröffentlichungen, wie z.B. von Kasper [Kas80] und Salm [Sal92, Sal 93] wird dieser Vorgang als „elektrostatische Dispersion“ bezeichnet. Befinden sich die geladenen Teilchen in einem geschlossenen Volumen, z.B. in einem Kessel, so werden die Partikel zu den Wänden hinbewegt und dort abgeschieden. Die zeitliche Konzentrationsänderung wurde von mehreren Autoren, wie z.B. in [Wol33, Wil47, Zeb57, Fos58], hergeleitet. Für ein monodisperses monogeladenes Aerosol gilt:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{Cu \cdot c^2 \cdot n^2 \cdot e^2}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot \varepsilon_0} = -\frac{B}{\varepsilon_0} \cdot c^2 \cdot n^2 \cdot e^2. \quad 2-71$$

Durch die Integration erhält man den Verlauf der Partikelkonzentration mit Zeit:

$$c(t) = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{n^2 \cdot e^2 \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot \varepsilon_0} \cdot t}. \quad 2-72$$

Bemerkenswert ist, dass die Konzentrationsänderung unabhängig von der Behältergeometrie ist. Die Homogenität der Raumladungsverteilung wird während der Partikelabscheidung mit der Zeit nicht verletzt. Ein Beispiel der Konzentrationsänderung während der elektro-

statischen Dispersion wird in der Abbildung 2-9 gezeigt. Es kann eine anfangs hohe Konzentrationsänderungsrate beobachtet werden, die mit dem Abbau der Partikelkonzentration stark nachlässt.

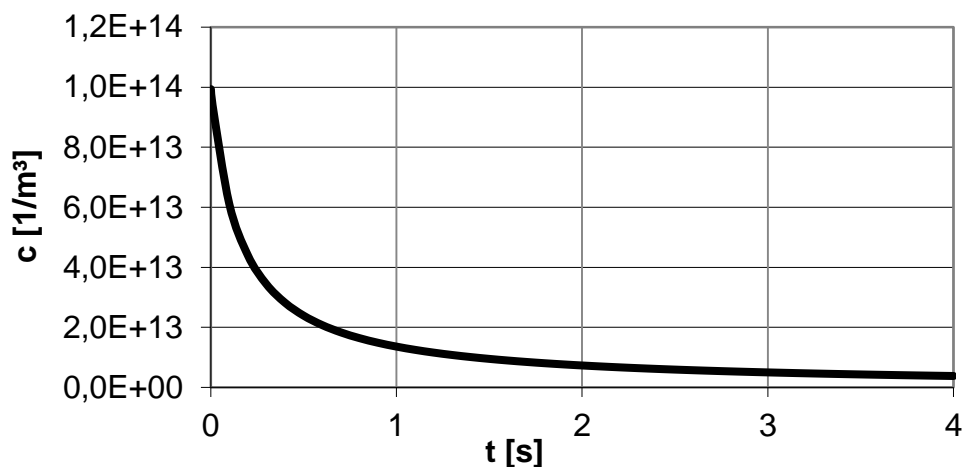


Abbildung 2-9 Verlauf der Partikelgesamtkonzentration während der elektrostatischen Dispersion von Teilchen. Anfangskonzentration $10^{14} 1/m^3$, Teilchendurchmesser 200 nm, Anzahl der Ladungen pro Teilchen 20

Für eine Partikelklasse k in einem polydispersen monogeladenen Aerosol gilt [Fai67]:

$$\frac{dc_k}{dt} = -\frac{B_k}{\varepsilon_0} \cdot c_k \cdot n \cdot e \cdot \sum_{k=1}^{k_{max}} c_k \cdot n \cdot e . \quad 2-73$$

Teilt man die Gleichung 2-73 für k -Partikelgröße durch die selbe Gleichung für Partikelgröße j , so bekommt man:

$$\frac{dc_k}{dc_j} = \frac{B_k \cdot n \cdot c_k}{B_j \cdot n \cdot c_j} = \frac{Z_{i,k} \cdot c_k}{Z_{i,j} \cdot c_j} . \quad 2-74$$

Durch die Integration erhält man:

$$\frac{c_k}{c_{0,k}} = \left(\frac{c_j}{c_{0,j}} \right)^{\frac{Z_{i,k}}{Z_{i,j}}} . \quad 2-75$$

Dieses Verhältnis zeigt, dass Teilchen mit einer höheren elektrischen Mobilität schneller abgeschieden werden als die Teilchen mit geringerer Mobilität. Allgemein gelten die Gleichungen 2-71 bis 2-75 für ein anfangs ideal vermischtes Aerosol. Die Partikelverluste durch Koagulation, Diffusion und Spiegelladungseffekte bleiben unberücksichtigt. Auch die möglichen axial wirkenden Kräfte (bei bestimmten Leitungsgeometrien), die Teilchen in Richtung kleinerer Raumladungsdichten flussaufwärts bewegen können, können erheblichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben [Fai67].

Für die zeitliche Änderung der Raumladungsdichte eines monodispersen monogeladenen Aerosols gilt:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{B}{\varepsilon_0} \cdot c^2 \cdot n^3 \cdot e^3. \quad 2-76$$

Die Raumladungsverluste in einem monodispersen Aerosol mit einer inhomogenen Ladungsverteilung sind immer höher als die im Fall einer homogenen Verteilung [Lüb11]:

$$\frac{d\rho_p}{dt} = -\frac{c^2 \cdot \bar{n} \cdot e^3 \cdot Cu}{\varepsilon_0 \cdot 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \cdot \sum_n n^2 \cdot h(n) = -\frac{c^2 \cdot \bar{n} \cdot e^3 \cdot Cu}{\varepsilon_0 \cdot 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \cdot (\bar{n}^2 + \sigma_n^2(n)), \quad 2-77$$

mit $h(n)$ - relativen Häufigkeit der Ladungsklasse n .

Die elektrostatische Dispersion ist nur einer von mehreren Mechanismen, die zur Senkung der Aerosolkonzentration führen. Bei Teilchen kleiner 0,1 μm mit einer geringen Teilchenladung sind die Koagulation und Diffusion zu den Wänden bedeutsam [Kas80]. Generell wird eine Verlangsamung der Koagulation durch die elektrostatische Dispersion beobachtet [Zeb57]. Bei geladenen Aerosolen mit niedrigen Konzentrationen (etwa 10^5 1/cm^3) in kleinräumigen Behältern ist die Abscheidung durch Bildkräfte der wirkende Mechanismus [Yu77].

In einigen Veröffentlichungen sind experimentelle Ergebnisse zur Partikelabscheidung durch die elektrostatische Dispersion zu finden. Kasper [Kas80] wies in seinen Untersuchungen eine gute Übereinstimmung der gemessenen und gerechneten Dispersionskoeffizienten für d_p von 20 bis 130 nm unter Berücksichtigung von Sedimentation und Diffusion nach und fand, dass die Gleichung 2-72 auch für laminare Strömungsprofile gute Ergebnisse liefert. Foster [Fos58] ermittelte die Partikelgröße und Partikelladung aus der Partikelabscheidung durch Raumladungseffekte in einem geerdeten Zylinder. Barat [Bar02] modellierte die Partikelpenetration durch einen geerdeten Zylinder unter Berücksichtigung von Diffusion. Katzer [Kat01] hat die Kollisionsraten und die elektrostatische Dispersionsraten von TiO_2 -Agglomeraten theoretisch und experimentell untersucht.

Die elektrostatische Dispersion wird gezielt zum Zweck der Gasreinigung [Han69, Bol01, Bol09, Pau10] und zur Vorbeugung von Aerosolagglomeration [Xu09] genutzt. Die Raumladungseffekte können erhebliche Fehler bei der Messung von Aerosolen verursachen [Szy85, Bar90_1, Bar90_2, Alo00]. Das Einatmen von geladenen Teilchen führt zur erhöhten Teilchenablagerung in den Lungen [Wil47, Pro85, Bai97]. Das sollte bei dem Einsatz von elektrischen Abscheidern (insbesondere mehrstufiger Ausführungen) und einer Raumluftrückführung beachtet und durch regelmäßige Kontrollen überwacht werden.

Elektrostatische Dispersion und Bildkraft

Wenn die Partikelkonzentration von geladenen Teilchen gering ist, wird die Wechselwirkung durch Teilchenabstoßung vernachlässigbar im Vergleich zur Wechselwirkung zwischen dem Teilchen und der Wand. Auf ein Teilchen mit n Ladungen, das sich in einem leitfähigen geerdeten Zylinder mit Radius R befindet, wirkt die Bildkraft F_{Bild} [Yu76]:

$$F_{Bild} = \frac{(n \cdot e)^2 \cdot r^2}{16 \cdot \pi \cdot r_R^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot (r_R - r)^2} \quad 2-78$$

Mit r - radialer Lage des Teilchens [m], r_R - Rohrradius [m].

Die aus dieser Kraft resultierende Geschwindigkeit des Teilchens wird als

$$W_{Bild} = \frac{dr}{dt} = B \cdot F_{Bild} \quad 2-79$$

gefunden. Mit $B = Cu \cdot (3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p)^{-1}$ - Beweglichkeit des Teilchens.

Yu beschäftigte sich in seinen Untersuchungen [Yu76, Yu77, Yu79] mit dem Vergleich der Partikelabscheidung durch Spiegelladungseffekte und durch elektrostatische Dispersion. Seine Untersuchungen zeigten, dass die Wahrscheinlichkeit der Anlagerung eines Teilchens durch Bildkraft unabhängig von der Partikelkonzentration ist und mit Erhöhung von Partikelladung steigt.

Nennenswerte Geschwindigkeiten erreichen die Teilchen aber nur in der unmittelbaren Wandnähe (wenige μm), siehe Abbildung 2-10.

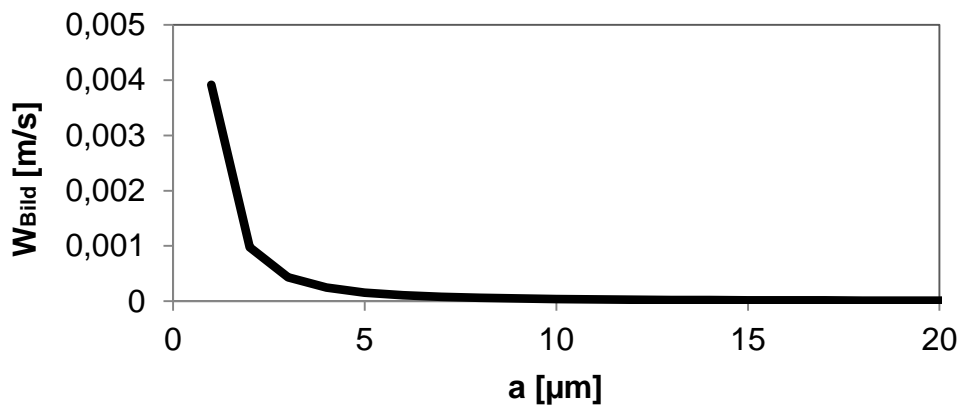


Abbildung 2-10 Teilchengeschwindigkeit W_{Bild} als Funktion des Abstandes von der Wand. $d_p=1 \mu\text{m}$; $n=100$

2.2.9 Elektrostatisches Abtropfen und Elektrospray

In einem nass betriebenen Elektroabscheider sind die Elektrodenoberflächen mit Flüssigkeit benetzt. Gelangt der Flüssigkeitsfilm in den Bereich von hohen Feldstärken (z.B. Sprühelektrodenoberfläche, stark gekrümmte Niederschlags Elektrodenoberfläche), so kann es zum elektrostatischen Abtropfen und, unter Umständen, zur Bildung eines Elektrosprays kommen. Die Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch einige Zerstäubungs-Geometrien, die je nach Feldstärke am Ende eines Kapillarrohres auftreten können.

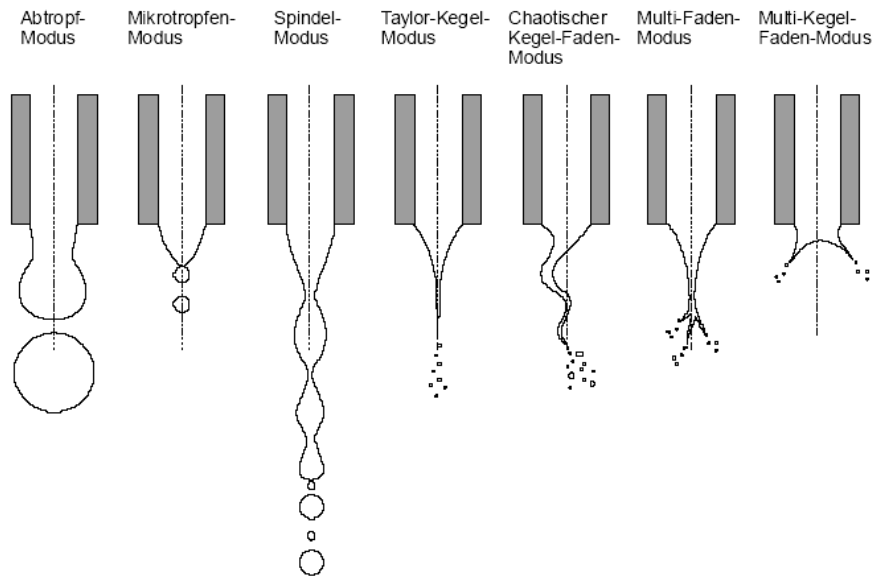


Abbildung 2-11. Unterschiedliche Flüssigkeitsoberflächen beim elektrostatischen Zerstäubern mit zunehmender Feldstärke (von links nach rechts) [Loh00]

Großteils findet das Abtropfen in den Bereichen statt, wo die Feldstärken klein sind. Das Abreißen vom Tropfen erfolgt, wenn die Oberflächenspannungskraft F_σ kleiner als die Summe aus Schwerkraft F_g und elektrischer Kraft F_E ist [Wal97]:

$$F_\sigma = F_E + F_g. \quad 2-80$$

Dieser Vorgang ist diskontinuierlich und wird lediglich durch das Ansammeln von der Flüssigkeit bewirkt. Steigt die Spannung weiter, so wird der Abtropfvorgang beschleunigt, die Tropfen werden kleiner und die Abtropffrequenz nimmt zu. Bei hohen Feldstärken erfolgt das Abtropfen in einem Corona-Modus.

Wenn die Abstoßung der gleichnamigen Ladungen im Tropfen höher als die Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist, findet der Tropfenzerfall statt. Bei einer Tropfenoberfläche $S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ beträgt die Maximalladung (sog. Rayleigh-Limit):

$$q_R = 8\pi\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot r^3}, \quad 2-81$$

mit σ - Oberflächenspannung, N/m.

Die Feldstärke, die zum Erreichen der Rayleigh-Grenze erforderlich ist, wird als:

$$E_R = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_r + 2}{\varepsilon_r} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot r}} \quad 2-82$$

gefunden.

Die Leitfähigkeit der Flüssigkeit beeinflusst die Partikelgröße und den Aerosolvolumenstrom während des Zerstäubens.

Während des Elektrosprays entstehende Teilchen sind hoch geladen und sehr mobil. Diese hochmobilen Teilchen werden schnell im elektrischen Feld abgeschieden und beeinflussen direkt die Partikelemission nicht. Allerdings kann Bildung des Elektrosprays an der Niederschlagsselektrode zur Partikelumladung (und Entladung), und zur Senkung der Betriebsspannung in der 2.Stufe eines nass betriebenen Elektroabscheiders führen [Fel80].

Bereits bei sehr kleinen Feldstärken kann ein Tropfen im elektrischen Feld Ladungen aufnehmen und diese beim Abtropfen transportieren.

3 Stand der Technik

In den letzten Jahrzehnten wurden viele verschiedene Bauarten und Modelle von Elektroabscheidern entwickelt und untersucht, mit dem Ziel die Abscheideeffizienz zu verbessern und die Einsatzmöglichkeiten auszubreiten. So finden sich umfangreiche Überblicke von Elektrofilter-Entwicklungsrichtungen in [Jaw07, Par97].

In diesem Kapitel wird vor allem auf die Elektroabscheider eingegangen, die einen mehrstufigen Aufbau haben und Ähnlichkeiten zu dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten ARA-Abscheider aufweisen. Auch historisch gesehen wichtige Entwicklungen werden vorgestellt.

3.1 Mehrstufige Elektroabscheider

Zwar kommen die einstufigen Elektroabscheider am meisten zum Einsatz, es werden derzeit auch zwei- oder mehrstufige Elektroabscheider-Konstruktionen öfter eingesetzt. In einem zweistufigen Elektroabscheider werden die Bereiche für die Partikelaufladung und Partikelabscheidung getrennt aufgebaut (Kapitel 2.1).

Als Hauptvorteil von zweistufigen Elektroabscheidern wird immer noch eine deutlich geringere Ozonproduktion gesehen. Aus diesem Grund wird die positive Elektroabscheider-Polarität bevorzugt. Dem reduzierten Energieverbrauch wird momentan noch eine untergeordnete Rolle zugeschrieben. Zweistufiger Aufbau erlaubt vor allem die Realisierung viel größerer Abscheidefläche in der 2.Stufe. Als Beispiel wird ein zweistufiger Plattenabscheider in der Abbildung 3-1 gezeigt.

Die Trennung der Partikelaufladung und der Partikelabscheidung bringt einige schwer zu lösende Aufgaben mit sich. Findet in der Kollektorstufe ein Reentrainment statt (z.B. während der Abreinigung), so können die in den Gasstrom zurückgekehrten Teilchen nicht mehr aufgeladen und abgeschieden werden. Zwar wurden von einigen Autoren (wie z.B. Penney in [Pen89]) spezielle Geräte zur Reinigung von Elektroden vorgeschlagen, dennoch werden wegen dieser Problematik die meisten zweistufigen EA nur zur Abscheidung von flüssigen Aerosolen eingesetzt oder nass abgereinigt.

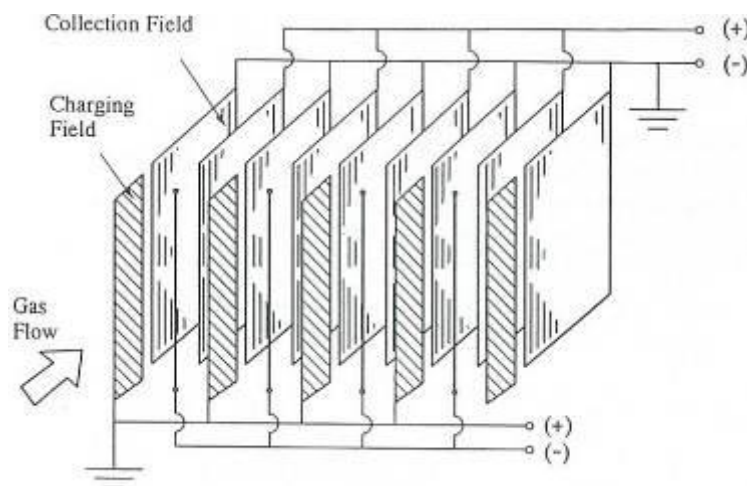


Abbildung 3-1 2-Stufiger Elektroabscheider. Plattenbauweise [Par97]

Eine andere Problematik wird durch die fertigungstechnischen Möglichkeiten bestimmt – Qualität der Blechverarbeitung: scharfe Kanten und Verunreinigung der Elektrodenoberflächen führen zum erhöhten Stromfluss in der Kollektor-Stufe und somit zur Entladung und Umladung der abzuschneidenden Partikeln. Analog zum Reentrainment hat es eine Senkung der Abscheideleistung zur Folge. Auch die maximale Betriebsspannung wird davon beeinflusst.

Der andere Vorteil ist eine viel höhere mögliche Betriebsfeldstärke in der 2.Stufe. Uzhov berichtet über mittlere Feldstärken im Auflader von 4-5 kV/cm und 8-10 kV/cm im Kollektor [Uzh62]. Zusammen mit kleinen Gassenbreiten im Kollektor ergibt sich dadurch ein sehr effektiver Aufbau. Extra kleine Gassenabstände in der 2.Stufe (z.B. 0,159 cm) erlauben den Betrieb bei niedrigen Spannungen [Pen89]. Dabei können zu hohe Betriebsspannungen in der 2.Stufe Entladungen zwischen Niederschlagsplatten hervorrufen, die Ozon produzieren (berichtet für den Plattenabstand von 0,3 cm in der 2.Stufe) [Hau86].

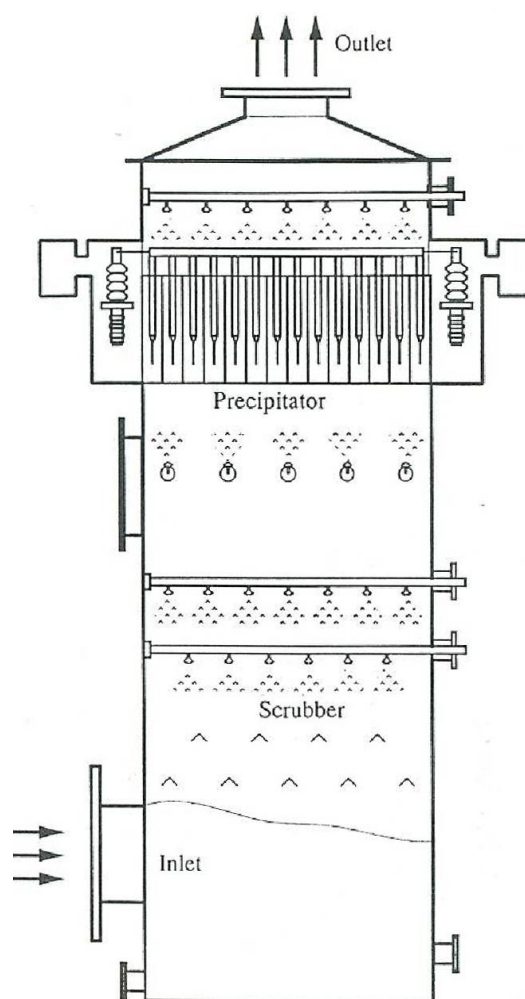


Abbildung 3-2 Zweistufiger Elektroabscheider in der Kombination mit Wäscher. Rohr-Bauweise [Par97]

Ein typischer Einsatz von zweistufigen EA ist die Abscheidung von niedrig konzentrierten submikronen Aerosolen. Es sind auch Veröffentlichungen zu finden, in denen vom Vorteil der einstufigen Elektroabscheider-Ausführung gegenüber zweistufigen gesprochen wird. Z.B. verglich [Hua02] die Abscheideleistung von ein- und zweistufigen Elektroabscheidern in Bezug auf die Trennung von submikronen Teilchen. Allerdings ist dieses Ergebnis nur auf eine typischerweise etwas knappe Auslegung der Aufladestufe (wie auch in Abbildung 3-1

und Abbildung 3-2 gezeigt) zurückzuführen, da die Aufladung von submikronen Teilchen eine entsprechende Zeit benötigt (siehe Kapitel 2.2.1).

Im Fall, wenn die in der ersten Stufe aufgeladenen Teilchen durch die Kollektor-Stufe gelangen, kommt es durch Raumladungseffekte bei einer Raumluftrückführung zur verstärkten Abscheidung von diesen Teilchen an den Raumwänden und deren Verschmutzung [Electrically Charged dust in Rooms, zitiert in Pen89].

Die Vielfalt an verschiedenen Einsatzbedingungen und die damit verbundenen Auslegungs-Problematiken führen dazu, dass die modernen Elektroabscheidersysteme öfter als Komplexe von verschiedenen EA-Techniken realisiert werden [Cha03].

3.2 Raumladungsabscheider

Obwohl Elektroabscheider eines der effektivsten Mittel für die Gasreinigung sind, werden sie manchmal wegen hoher Investitionskosten nicht eingesetzt. Als ein einfacherer und kostengünstigerer Ersatz wurde von Wilke und Hanson ein Abscheider vorgeschlagen, der nur auf der Basis der Raumladungsabscheidung (Kapitel 2.2.8) funktioniert [Han69]. Ein dreistufiger Raumladungsabscheider wird in der Abbildung 3-3 gezeigt.

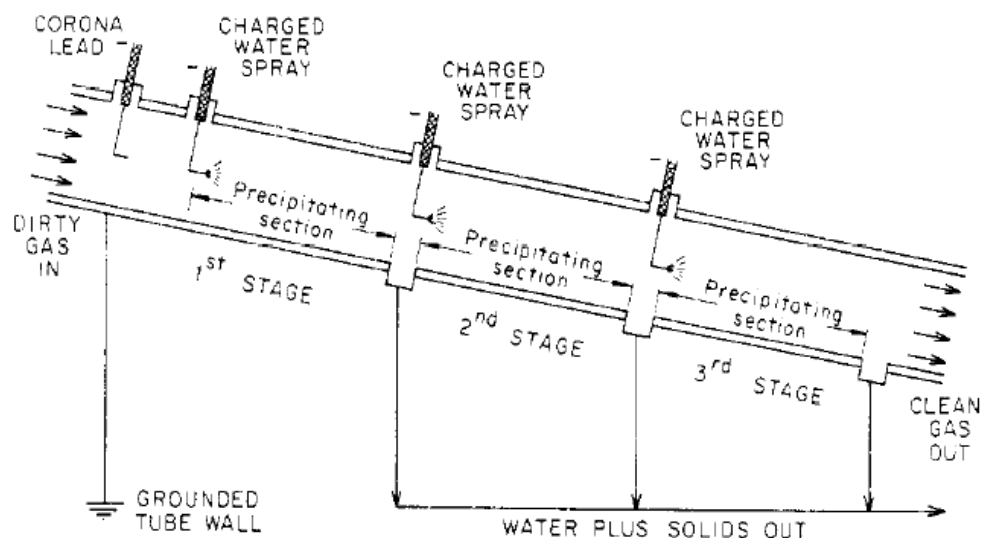


Abbildung 3-3. Dreistufiger Einzelrohr-Raumladungsabscheider nach [Han69]

Das partikelbeladene Gas tritt in den rohrförmigen Kanal ein, wo die festen Partikel durch eine konventionelle Corona-Entladung aufgeladen werden. Danach wird ein aufgeladenes Wasseraerosol durch eine Düse in das Gas eingegeben. Die geladenen Teilchen und Wassertropfchen werden durch das elektrische Feld, das durch ihre Raumladung gebildet wird, zu den geerdeten Wänden hin bewegt und dort abgeschieden. Die Raumladungsdichte verringert sich im Laufe der Zeit mit der Verminderung der Partikel- und Wassertropfchen-Konzentration und die Abscheiderate bricht entsprechend ein (Gleichung 2-72, Abbildung 2-9). Die für die Abscheidung notwendigen hohen Raumladungsdichten werden in weiteren Stufen durch das wiederholte Einspritzen von geladenen Wassertropfchen in die Gasströmung nachgeliefert. Auf diese Weise werden hohe Abscheidegrade (bis 99%) bei relativ kleinen Verweilzeiten erreicht. Als Nachteil des Verfahrens ist ein relativ hoher Wasserverbrauch zu sehen.

Für die Reinigung großer Gasströme wurde von Wilke und Hanson noch ein in der Abbildung 3-4 dargestellter Aufbau entwickelt. Um das Erreichen von für den Überschlagnotwendigen Feldstärken zu verhindern, wurde das Volumen nach dem Auflader mit schüttungsartigem leitfähigem Material gefüllt. Der Einsatz der Schüttung ersetzte an der Stelle die Verwendung von kostenintensiven Rohranordnungen.

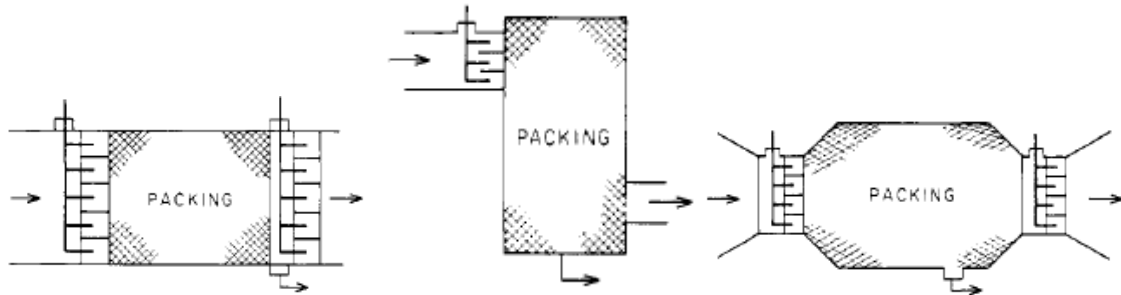


Abbildung 3-4. Mögliche Aufbauten eines mehrstufigen Raumladungsabscheiders nach [Han69]

Bologa entwickelte und beschrieb in einer Reihe von Veröffentlichungen [Bol01, Bol05, Bol09] einen CAROLA-Abscheider. Es handelt sich dabei um einen nass betriebenen Raumladungsabscheider in einstufiger oder mehrstufiger Ausführung (Abbildung 3-5).

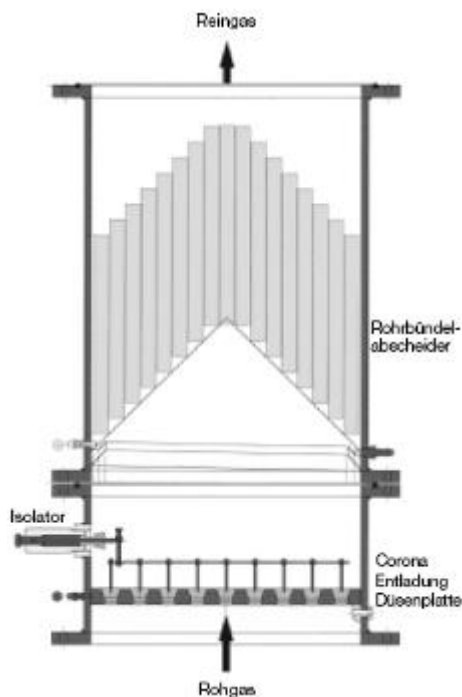


Abbildung 3-5. CAROLA-Abscheider [Bol05]

Der Abscheider besteht aus einer Hochgeschwindigkeitsionisationsstufe und einer geerdeten feldfreien Stufe, die aus einer turmförmigen Füllkörperanordnung besteht. In der Ionisationsstufe werden Teilchen bei sehr hohen Feldstärken von 10-17 kV/cm aufgeladen. In Abhängigkeit von der Rohgaskonzentration (c_m von 10-1000 mg/m³ und c_n bis $5 \cdot 10^7$ 1/cm³) können mit diesem Abscheider Trenngrade von 90-97% in einstufiger und bis 99% in zwei-stufiger Ausführung (zwei in der Reihe geschaltete CAROLA-Abscheider) erzielt werden.

Der spezifische Energieverbrauch der Abscheidung beträgt 760 J/m^3 und ist vergleichbar mit konventionellen Elektroabscheidern.

Die recht niedrigen Abscheidegrade vom CAROLA-Abscheider sind eventuell durch eine fehlerhafte Konstruktion bedingt: ein großer Hohlraum zwischen der Ionisationsstufe und der Kollektorstufe eignet sich ideal für die Erzeugung der Aerosol-Selbstentladung, die zum Abbau von Netto-Raumladung und anschließendem Zusammenbruch der Abscheidung durch elektrostatische Dispersion führt.

Mit der Verschärfung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes kommen die Raumladungsabscheider auch für die Reinigung der Kaminabgase zum Einsatz [Pau10].

Die Abscheidung durch raumladungsgetriebene elektrische Felder findet als Synergieeffekt in vielen anderen Verfahren statt, wo das Aerosol zur Verbesserung der Abscheidung zusätzlich aufgeladen wird. Die meist verbreiteten Anwendungs-Beispiele sind: elektrostatisch unterstützte Filtration [Hel82, Pla00], Ionisationswäscher [Pil74, Sie91, Lai97, Lai00, Met97] und andere [Arg80].

3.3 Erzeugung der Hochspannung mit unipolar geladenen Aerosolen

Bereits im Jahr 1845 hat Armstrong eine Dampfelektrisiermaschine erfunden, die mithilfe eines durch Reibung aufgeladenen Dampfes statische Elektrizität auf einem isolierten Kessel gebildet hat. Seitdem hat es mehrere Arbeiten gegeben, die als Ziel die Erzeugung hoher Spannungen mit Hilfe unipolar geladener Aerosole hatten. So hat Burkhardt [Bur35] im Jahr 1935 mit aufgeladenem Magnesiumoxid-Aerosol an einem Wattefilter Spannungen von 6 kV erzielt und später mit aufgeladenem Wasser-Aerosol auf einem isoliert aufgehängtem Behälter Spannungen von 420 kV erreicht. Die erreichte Spannung wurde durch unkontrollierte Entladungsvorgänge zwischen dem Behälter und der Ionisationsdüse begrenzt.

Die Ausnutzung der aufgebauten elektrischen Felder für die Partikelabscheidung wurde von Postma et al. in [Pos77] patentiert. Mit Hilfe einer zweistufigen Anordnung, die aus einem Corona-Auflader und einer elektrisch resistiven Schüttung bestand, hat er in der 2. Stufe durch die Abscheidung von geladenen Teilchen in der Schüttung höhere elektrische Felder aufgebaut und diese Felder zur verstärkten Teilchenabscheidung genutzt (Abbildung 3-6).

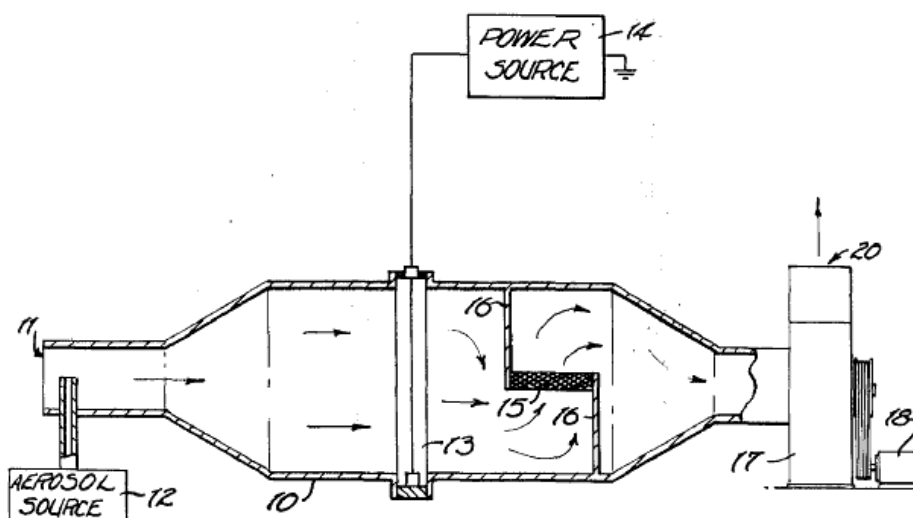


Abbildung 3-6. Teilchenabscheidung im selbstaufgebauten elektrischen Feld [Pos77]

Dabei wurden relativ mäßige Effekte erzielt, da die erhöhten Feldstärken nur am Rand der Schüttung erzeugt wurden. Der Aufladevorgang der Schüttung verlief unkontrolliert. Es wurden Gesamtabscheidegrade von ca. 95 % erreicht.

3.4 Energieverbrauch der Abscheidung. Angaben aus der Literatur.

Da der Energieverbrauch in einer sehr engen Beziehung zur Abscheideleistung, zur Elektroabscheider-Geometrie (bzw. Größe) und zur Belastung ist, wäre der alleinige Vergleich von Energieverbräuchen verschiedener Anlagen unvollständig. Leider werden in der Literatur solche Informationen im vollen Maß nur selten angegeben. Auch die Angaben zu den Industrie-Abscheidern sind viel seltener zu finden, als die der Laboranlagen.

Je nach Einsatzgebiet- Nanoaerosole oder normale Aerosole – stellen sich verschiedene Betriebsanforderungen.

Surati in [Sur81] gibt einen Energieverbrauch von 848 J/m³ für einen einstufigen und 265 J/m³ für einen zweistufigen Elektroabscheider an, allerdings ohne genaue Angaben zur Abscheideleistung zu machen. Parker in [Par97] gibt für eine Abscheideleistung von 99% einen Energiebedarf von 500 J/m³ und größer für einen Draht-Rohr-Elektroabscheider und von 170 J/m³ und höher für einen Draht-Platte-Elektroabscheider an. Entsprechend werden 1000 J/m³ bei einem Draht-Platte-Elektroabscheider für die Abscheideleistung von 99,9 % benötigt. Für einen einstufigen Grobelektrofilter zur Abscheidung vom Rauchgas gibt Uzhov einen Energieverbrauch von 720 J/m³ an [Uzh62]. Der Vergleich wird in der Abbildung 3-7 veranschaulicht.

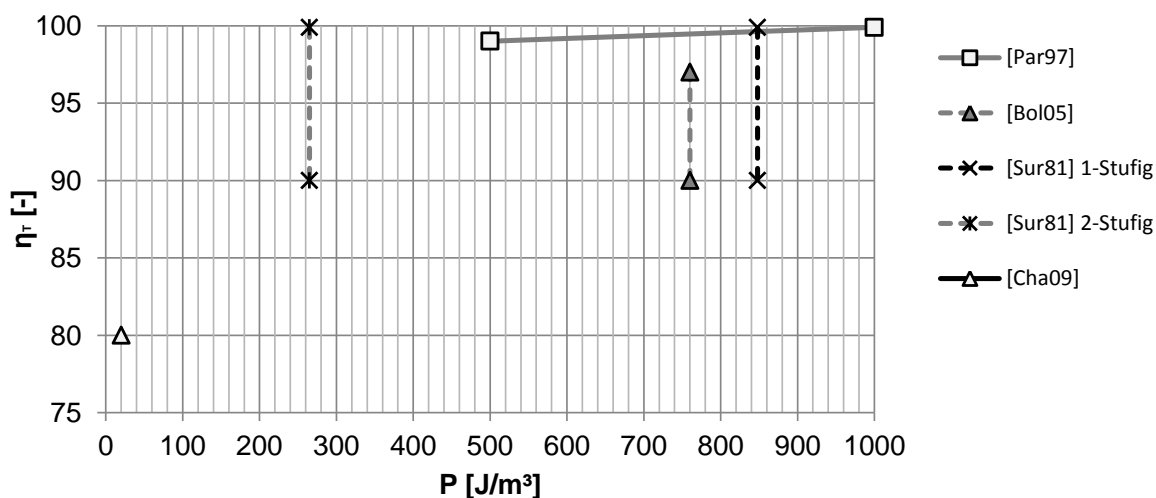


Abbildung 3-7 Spezifischer Energiebedarf der Abscheidung. Angaben aus der Literatur

3.5 Zusammenfassende Bewertung

Jedes der dargestellten Elektroabscheider-Konzepte weist einige Stärken und Schwächen auf, die durch die entsprechenden Einsatzbedingungen optimal genutzt oder verhindert werden können. Die Raumladungsabscheider haben vergleichsweise geringe Investitionskosten, einen niedrigeren Energieverbrauch und sind nachrüstbar. Das Einsatzgebiet bleibt aber trotzdem begrenzt, da das Funktionsprinzip hohe Aerosolkonzentrationen benötigt und keine 100%-Abscheidung gewährleisten kann. Vielmehr sind Raumladungsabscheider als Teil der mehrstufigen Abscheider geeignet, insbesondere für die günstige Reduzierung von hohen

Teilchenkonzentrationen. Die zweistufigen Elektroabscheider können dagegen die maximalen Abscheidegrade erzielen, sind auch energetisch effizienter als die einstufigen, werden aber aufgrund der Reentrainment-Problematik in der 2.Stufe meistens für die Abscheidung von flüssigen Aerosolen eingesetzt.

4 ARA-Konzept. Voruntersuchungen

Im Vordergrund des Prinzips der Autogenen Raumladungsgetriebenen Abscheidung (ARA) steht die Nutzung des Raumladungseffektes in einem mehrstufigen Verfahren. Um den Einsatz des ARA-Verfahrens zu ermöglichen, ist die Anwesenheit eines hochkonzentrierten geladenen Aerosols notwendig. In dem Fall, dass die Netto-Ladung des Aerosols gering ist, muss eine Auflade-Stufe realisiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird vom Letzteren ausgegangen und die Berechnungsgrundlagen sowohl für die Aerosolaufladung als auch für die Aerosolabscheidung werden präsentiert und diskutiert.

Die Kernidee des Konzeptes betrifft den Aufbau der nach dem Auflader folgenden Kollektor-Stufe und wird in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Kollektor-Stufe besteht im Ganzen aus einer vom Gehäuse elektrisch isolierten potentialfreien Elektrode (weiter PFE) und einer Anordnung von Niederschlagselektroden (NE).

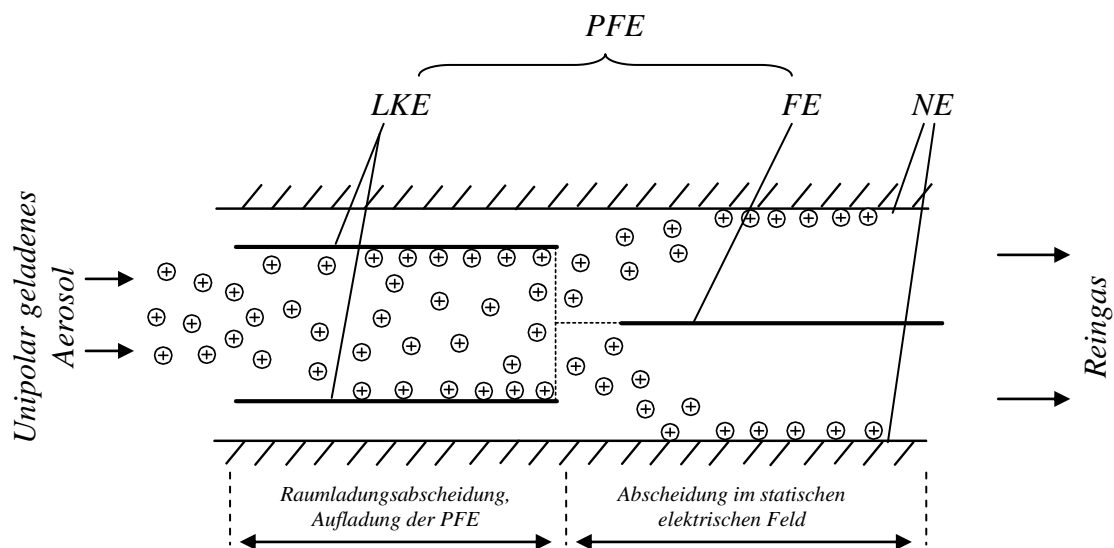


Abbildung 4-1 Prinzip-Schema der autogenen raumladungsgetriebenen Abscheidung

Die potentialfreie Elektrode wird nach der Funktion und auch Auslegung in eine Ladungskollektorelektrode (LKE) und eine Feldelektrode (FE) unterteilt.

Die Aufgabe der Ladungs-Kollektorelektrode ist das Sammeln von den Ladungen, die vom aufgeladenen Aerosol getragen werden. Dabei umschließt die LKE das geladene Aerosol nach der Art eines Faraday-Käfigs, so dass keine elektrischen Felder einwirken können, und die raumladungsgetriebene Abscheidung im Inneren der LKE unabhängig vom Potential der gesamten PFE ist. Damit können in der 2. ARA-Stufe sehr hohe Potentiale erreicht werden (Hunderte von Kilovolt), die vielfach höher sein können als die Betriebsspannung der Corona-Entladung, die zur Aufladung des Aerosols eingesetzt wird. Die Funktion der Ladungs-Kollektorelektrode ist damit analog der Funktion eines van-der-Graff-Bandgenerators mit dem Unterschied, dass hier das unipolar geladene Aerosol die Rolle des Bandes übernimmt.

Solch eine unbegrenzte Aufladung würde zum Erreichen von Durchbruchfeldstärken und einer Entladung von der PFE führen. Die Begrenzung von der Betriebsspannung kann mit Hilfe einer Corona-Anordnung erfolgen und wird im Weiteren diskutiert.

Die Ladungs-Kollektorelektrode wird anschließend elektrisch mit der Feldelektrode verbunden. Dadurch entsteht zwischen der Feldelektrode und der geerdeten Niederschlags-elektrode ein Bereich hoher Feldstärken, in dem auch gering geladene Partikel abgeschieden werden.

Die Wirksamkeit des Verfahrens ist stark von den Eigenschaften der Isolation und Anwesenheit ausreichender partikelgebundener Raumladungsdichten abhängig. Das führt dazu, dass die Elektrodenreinigung möglichst berührungslos erfolgen soll, um die Entladung der potentialfreien Elektrode zu vermeiden. Das gilt vor allem für den Bereich der Ladungs-Kollektorelektrode, da nur hier die Partikelabscheidung auf der PFE stattfindet. Bei der Abscheidung von flüssigen Aerosolen laufen diese selbst von den Elektroden ab, weswegen keine Abreinigung benötigt wird. Deswegen wird der Einsatz des Verfahrens zuerst nur auf den Bereich flüssiger Aerosole beschränkt.

Die ersten Untersuchungen erfolgten mit der in der Abbildung 4-2 dargestellten Anordnung. Als Auflader dient ein Draht-Rohr Elektroabscheider. Die ARA-Stufe wird auf der Basis von zwei koaxialen Rohr-Elektroden realisiert. Die eine davon dient als die potentialfreie Elektrode, die andere als das geerdete Gehäuse. Die PFE wurde auf einem Isolator-Glasrohr befestigt und nur bis zur Montagestelle im oberen Drittel durchströmt. Das aus dem Auflader strömende geladene Aerosol tritt damit zuerst in die PFE ein und wurde anschließend durch Öffnungen nach außen umgeleitet und strömte zwischen der PFE und NE.

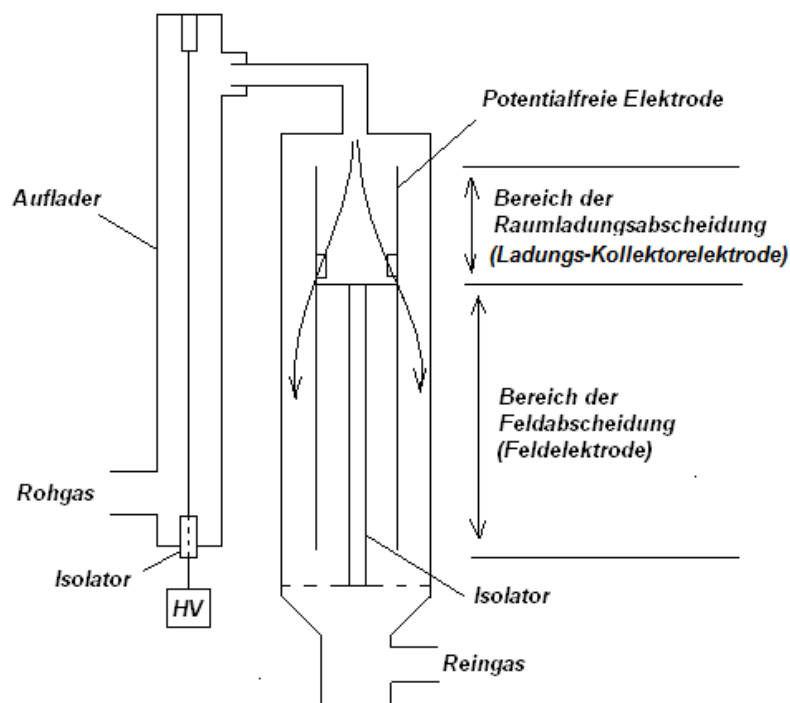


Abbildung 4-2 ARA-Vorversuchsanlage

Die Partikelkonzentration am Austritt wird mit einem Partikelzähler erfasst und ist in Abhängigkeit vom PFE-Potential in der Abbildung 4-3 dargestellt. Im Laufe des Versuchs

wird ein linearer Anstieg des PFE-Potentials gemessen. Parallel zum Anstieg des Elektrodenpotentials wird die Senkung der Partikelgesamtkonzentration beobachtet.

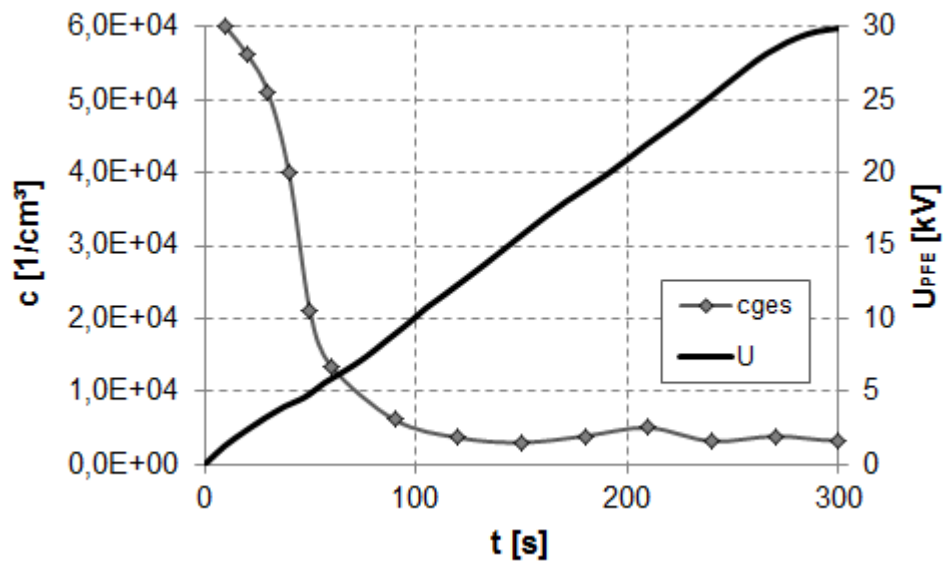


Abbildung 4-3 Konzentrationsverlauf am Austritt aus der Versuchsanlage im Laufe der PFE-Aufladung

In einem weiteren Vorversuch wurden zwei unterschiedlich lange Auflader verwendet. Die Betriebsparameter der Auflader wurden so eingestellt, dass eine konstante Reingaskonzentration von 10^4 1/cm³ eingehalten wurde. Das Ergebnis zeigt, dass die volumenspezifische Leistung näherungsweise umgekehrt proportional zur Aufladerlänge ist, siehe Abbildung 4-4.

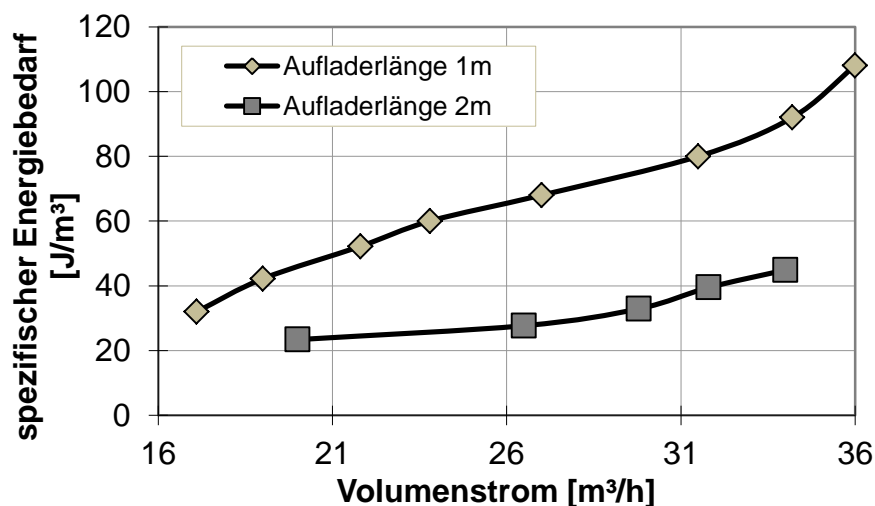


Abbildung 4-4 Spezifischer Energiebedarf für das Einhalten einer Reingaskonzentration von 10^4 1/cm³ bei verschiedenen Aufladerlängen

Weitere mögliche Aufbauarten des autogenen raumladungsgetriebenen Abscheiders sind im Anhang 12.1 dargestellt.

Das Konzept der autogenen raumladungsgetriebenen Abscheidung realisiert die im Stand der Technik beschriebenen Vorteile von Raumladungsabscheidern und zweistufigen

Elektroabscheidern: der Einsatz bei hochkonzentrierten Aerosolen, geringe Investitionskosten, geringer Energieverbrauch. Durch den kontrollierten Feldaufbau können im Gegensatz zu den konventionellen Raumladungsabscheidern viel höhere Abscheidegrade erzielt werden.

5 Auslegung der ARA-Anlage

In diesem Kapitel werden die Berechnungsgrundlagen und die wichtigsten technischen Details, die für die Auslegung einer kompletten ARA-Anlage von Bedeutung sind, vorgestellt und diskutiert.

Die Wirkungsweise der ARA-Anlage lässt sich in folgende Arbeits-Schritte unterteilen:

- Aufladung des Aerosols
- Transport des geladenen Aerosols zur ARA-Kollektor-Stufe
- Aufladung der potentialfreien Elektrode durch die elektrostatische Dispersion in der Ladungs-Kollektorelektrode
- Aerosolabscheidung im elektrischen Feld zwischen den Feldelektroden und Niederschlagselektroden

Es wird in den oben dargestellten Schritten diskutiert.

5.1 1. Stufe. Auflader

5.1.1 Ziele der Aufladung

Als Auflader wird ein Elektroabscheider im gequenchten Betriebsregime verwendet. Die Aufladung des Aerosols in der ersten Stufe hat mehrere Ziele. Erstens, wie in einem konventionellen zweistufigen Elektroabscheider, sollen die Teilchen auf eine elektrische Beweglichkeit gebracht werden, auf der sie im elektrischen Feld der Kollektor-Stufe abgeschieden werden können. Zweitens, sollen hohe Raumladungsdichten erzeugt werden, die für die Aufladung der potenzialfreien Elektrode des ARA-Kollektors ausreichen.

Der Betrieb des Aufladers unter Anwesenheit eines hochkonzentrierten Aerosols findet im gequenchten Regime statt (siehe Kapitel 2.2.7). Die Abbildung 5-1 stellt den typischen zeitlichen Verlauf des Stromes und der Partikelraumladungsdichte im Auflader dar.

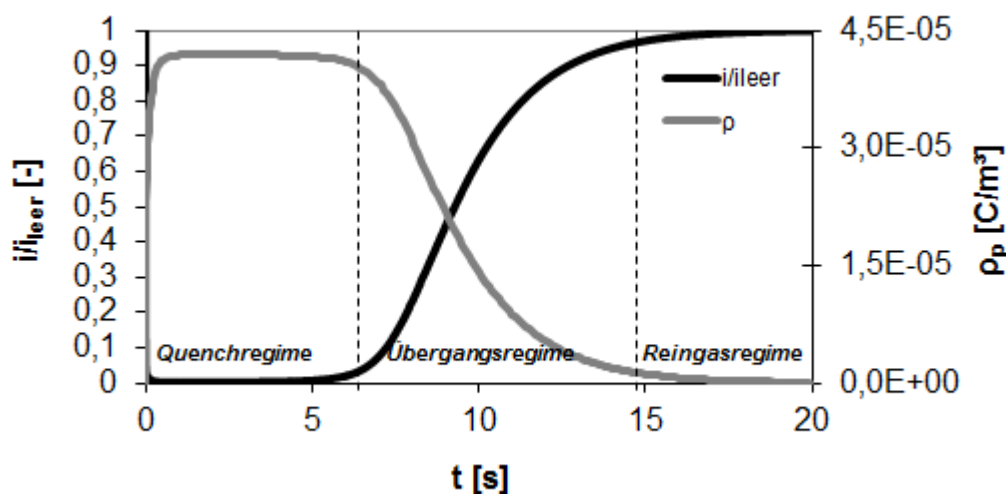


Abbildung 5-1 Strom- und Raumladungsdichtenverlauf im gequenchten EA. Einsatzspannung 8000 V; Arbeitsspannung 20000 V; Drahtradius 0,1mm; Rohrradius 0,1 m; Teilchendurchmesser 200 nm; Anzahlkonzentration 10^{14} 1/m³. 1-D Simulation nach Lübbert [Lüb11]

Der anfangs fließende Strom (ggf. bis ca. 0,5 s) dient zur Aufladung von Teilchen und zum Aufbau der partikelgebundenen Raumladung. Durch die erzeugte Teilchenraumladung wird der Stromfluss unterdrückt (Ionenraumladungsdichte ist vernachlässigbar klein), und das Corona-Quenching tritt auf.

Wird die partikelgebundene Raumladung abgebaut, so kommt es zum Strom-Wiederanstieg (Ionen- und Partikelraumladung liegen vor), und der Übergangsbereich beginnt. Im Reingasbereich (ab ca. 97% des Leerlaufstromes) dominiert die Ionenraumladung.

Im Quenchregime, bei $i/i_{\text{leer}} < 0,05$, ist die Teilchenladerate an die Abscheiderate der partikelgebundenen Raumladung gebunden (Gleichung 2-63) und nimmt mit der Teilchenladung zu (Abbildung 5-2). Im Übergangsregime ($0,05 < i/i_{\text{leer}} < 0,97$) findet die Verlangsamung der Teilchenaufladung mit zunehmender Teilchenladung statt.

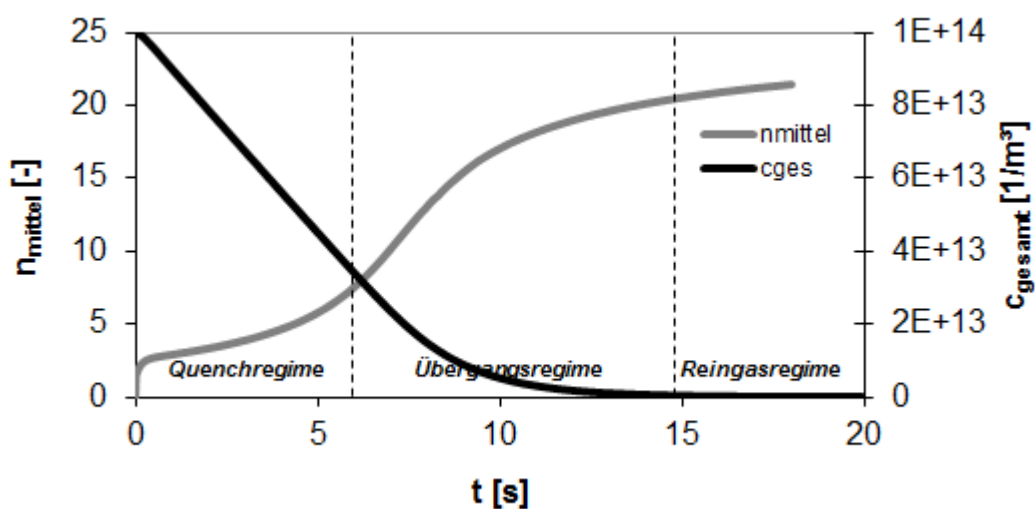


Abbildung 5-2 Zeitliche Verläufe der mittleren Partikelladung und der Partikelgesamt-Konzentration im gequenchten Elektroabscheider. Einsatzspannung 8000 V; Arbeitsspannung 20000 V; Drahtradius 0,1mm; Rohrradius 0,1 m; Teilchendurchmesser 200 nm; Anzahlkonzentration 10^{14} 1/m³. 1-D Simulation nach Lübbert [Lüb11]

Für die Funktion der Kollektor-Elektrode ist das $c^2 n^3$ -Produkt von besonderem Interesse, da es für die Aufladung der potentialfreien Elektrode verantwortlich ist (Gleichung 2-72 und 2-76). Die Abbildung 5-3 zeigt den zeitlichen Verlauf des $c^2 n^3$ -Produktes und des Stromes im gequenchten Auflader. Das maximale Produkt wird im „Übergangsbereich“ erreicht, und liegt etwas über dem von Lübbert als das Ende vom Quenchen definierten Stromwertes (Abbildung 5-4). Eine genaue Vorausrechnung des optimalen $c^2 n^3$ -Produktes ist allerdings nur mit Hilfe einer Simulation oder eines Experiments möglich. Eine viel einfachere Einschätzung kann über den Stromwert erfolgen: es sollen 10-30% des Leerlaufstroms erreicht werden.

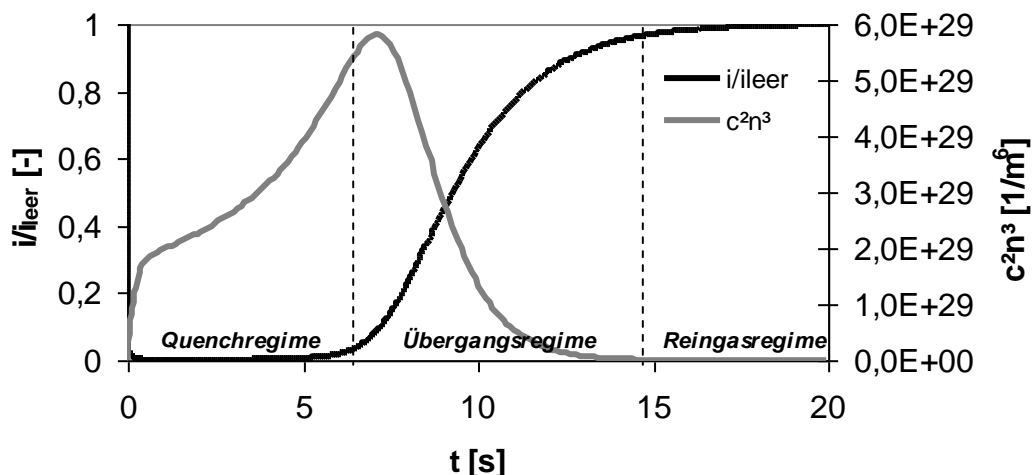


Abbildung 5-3 Strom und c^2n^3 -Produkt im gequenchten Auflader. Betriebsparameter: Einsatzspannung 8000 V; Arbeitsspannung 20000 V; Drahtradius 0,1mm; Rohrradius 0,1 m; Teilchendurchmesser 200 nm; Anzahlkonzentration 10^{14} 1/m³. 1-D Simulation nach Lübbert [Lüb11]

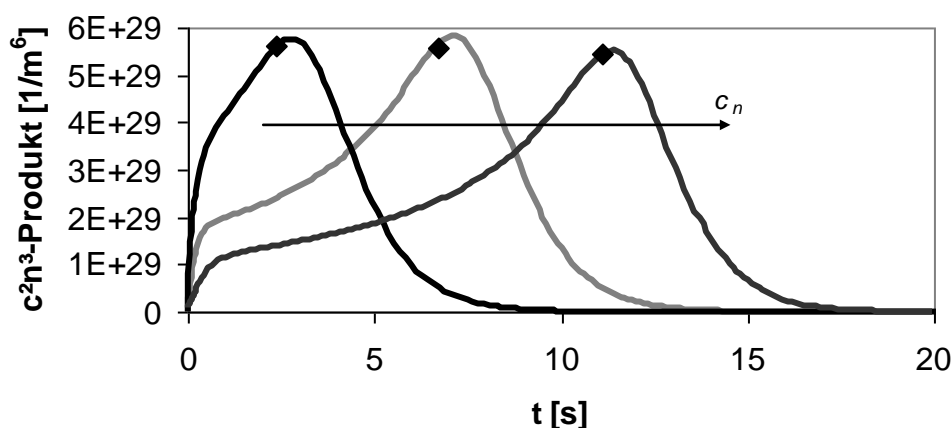


Abbildung 5-4 c^2n^3 -Produkt für verschiedene Partikelkonzentrationen: $c_n=5\cdot 10^{13}$; $1\cdot 10^{14}$; $1,5\cdot 10^{14}$ 1/m³. Betriebsparameter: Einsatzspannung 8000 V; Arbeitsspannung 20000 V; Drahtradius 0,1mm; Rohrradius 0,1 m; Teilchendurchmesser 200 nm; Anzahlkonzentration 10^{14} 1/m³. Schwarze Punkte kennzeichnen das Quenchende. 1-D Simulation nach Lübbert [Lüb11]

In Bezug auf die Partikelabscheiderate und somit die Quenchdauer kann eine optimale partikelgrößenunabhängige Geometrie eines gequenchten Draht-Rohr-Elektroabscheiders mit Hilfe der Gleichungen 2-55 bis 2-57 berechnet werden (Abbildung 5-5). Die maximale Abscheiderate sorgt für das schnelle Erreichen des Übergangsregimes und minimiert die Verweilzeit im Auflader [Lüb11].

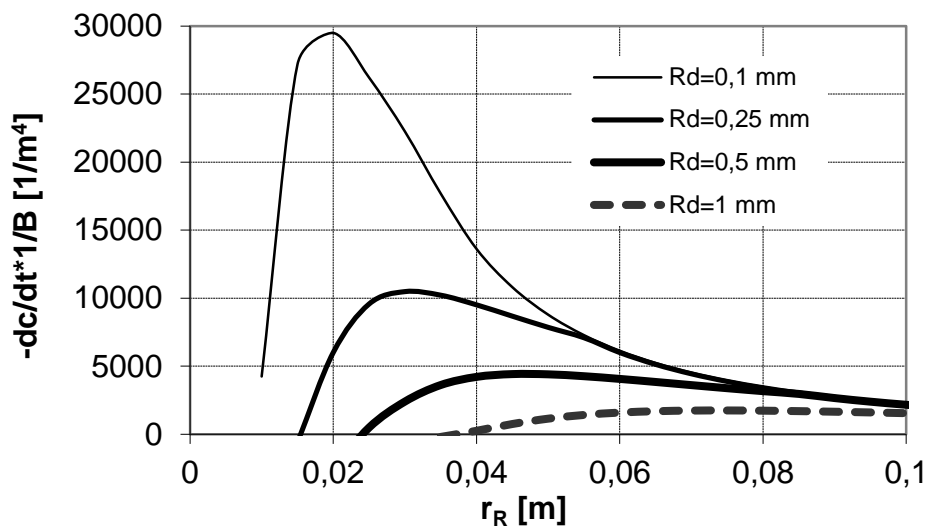


Abbildung 5-5 Abscheiderate in einem gequenchten Draht-Rohr-Elektroabscheider geteilt durch Teilchenmobilität für unterschiedliche Aufladerradien. Feldstärke begrenzt durch $E_{mittel}=0,6 \text{ MV/m}$, $E_{NE}=0,8 \text{ MV/m}$ [Lüb11]

5.1.2 Energiebedarf der Aufladung

Bei der Diffusionsaufladung von nanoskaligen Aerosolen ist das $n \cdot t$ -Produkt von Bedeutung (siehe Kapitel 2.2.1, Gleichung 2-7). Daher ist es vom Interesse, die Energieeinträge für seine Herstellung bei verschiedenen Elektroabscheider-Betriebszuständen zu vergleichen.

Unter Verwendung von Gleichungen 2-47 bis 2-51 lässt sich die Gesamtladung im Elektrodenzwischenraum eines partikelfreien Draht-Rohr Elektroabscheiders als

$$Q = \int_{r_D}^{r_R} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\epsilon_0 \cdot I} \cdot r_R^2 - \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\epsilon_0 \cdot I} \cdot r_D^2 + \frac{(2 \cdot \pi \cdot Z_i \cdot U_E \cdot L)^2}{\left(I \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)\right)^2}}} dr \quad 5-1$$

finden.

Durch die Integration erhält man die mittlere Ionenraumladungsdichte:

$$\bar{\rho}_i = \frac{Q}{V} = \frac{2}{r_R^2} \cdot \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\epsilon_0 \cdot I} \cdot r_R^2 \cdot r^2 - \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\epsilon_0 \cdot I} \cdot r_D^2 + \frac{(2 \cdot \pi \cdot Z_i \cdot U_E \cdot L)^2}{\left(I \cdot \ln\left(\frac{r_R}{r_D}\right)\right)^2}}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot Z_i}{\epsilon_0 \cdot I} \cdot r_R^2} \right) \bigg|_{r_D}^{r_R} \quad 5-2$$

Für einen gequenchten Elektroabscheider gilt:

$$\bar{\rho}_i = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\pi \cdot r^2 \cdot l} \cdot \frac{I}{Z_i} \cdot \int \frac{1}{E(r)} dr. \quad 5-3$$

Die Feldstärke wird entsprechend der Gleichung 2-56 eingesetzt. Man erhält:

$$\bar{\rho}_i = \frac{I \cdot r_R^2}{\pi \cdot r_R^2 \cdot Z_i \cdot L \cdot 4 \cdot \Delta U} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot \Delta U}{r_R^2} \cdot r^2 + \frac{U_E}{\ln \left(\frac{r_R}{r_D} \right)} \right) \right) \bigg|_{r_D}^{r_R}. \quad 5-4$$

Unter der Annahme $I_{gequench} = 0,05 \cdot I_{leer}$ lässt sich die mittlere Raumladungsdichte der Ionen pro Leistung pro Meter Sprühdraht berechnen (Abbildung 5-6). Es ist bemerkenswert, dass in beiden „Rand“-Betriebszuständen der Energieeintrag zur Herstellung von gleicher Ionenraumladungsdichte sich nur minimal unterscheidet. Zwar wird ein etwas höherer Energieaufwand im „Quench-Regime“ benötigt, die Ionenausnutzung ist aber in diesem Regime weit höher.

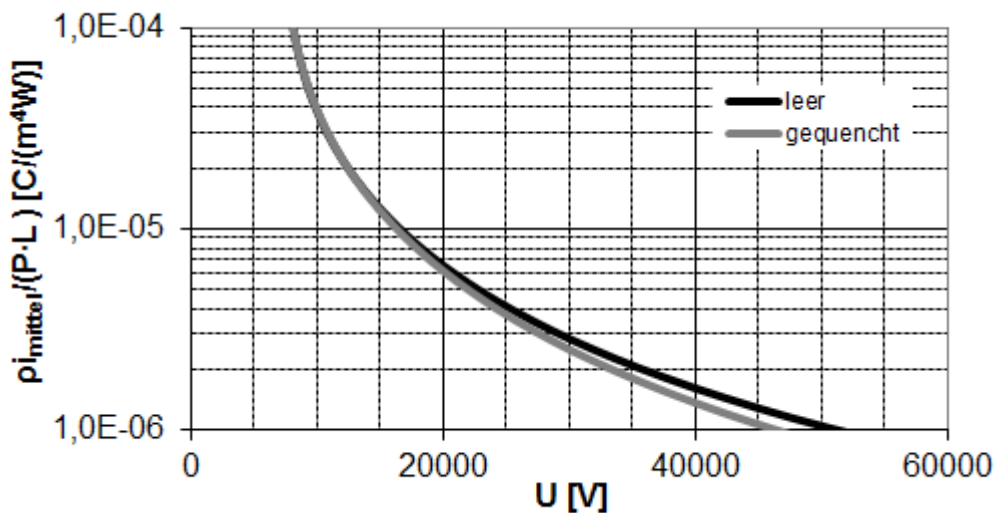


Abbildung 5-6 Mittlere Ionenraumladungsdichte pro Leistung pro Meter Sprühdraht im leeren und gequenchten Elektroabscheider. Rohrradius 0,1 m; Drahtradius 0,1 mm; Einsatzspannung 8000 V

Ein weiterer Aspekt, der den Energiebedarf beeinflusst, ist die Verweilzeit. Allgemein wird die folgende Entwicklung beobachtet: mit steigender Verweilzeit reduziert sich der Energiebedarf der Abscheidung [Lüb11].

Bei der Abscheidung von nanoskaligen Teilchen kann der Energieverbrauch durch die Änderung der Aufladerlänge angepasst werden. Mit der Vergrößerung der Sprühdrahtlänge und einem unveränderten Energieverbrauch erhöht sich die Ionenaufenthaltszeit im Elektrodenzwischenraum und die Aufladung wird effizienter.

5.1.3 Steuerung des Aufladers

Verschiedene Anlagenhersteller haben typischerweise ihre eigene Steuerungs-Philosophie. Die meisten Elektroabscheider-Regelungen haben das Ziel, nur wenig unterhalb von der Durchbruchfeldstärke zu arbeiten, um die Baugröße möglichst klein halten zu können. Da die Überschlagsspannung wegen schwankender Betriebsbedingungen nicht konstant ist, werden meistens entweder die Überschläge zugelassen oder es wird die Betriebsspannung auf einen kleineren Wert abgesenkt [Bat73]. Moderne computerbasierte Regelungen verarbeiten gleichzeitig auch mehrere zusätzliche Signale, wie z.B. optische Konzentrationsüberwachung, Steuerung der Elektrodenabreinigung u. s. w. [McI88]. Die existierenden Modelle haben die maximale Abscheideleistung im Visier und können im ARA-Verfahren nicht direkt übernommen werden.

Die einfachste Auswahl von Betriebsparametern begrenzt sich auf die Ansteuerung des Spannungs- oder Stromwertes. Wie in Kapiteln 5.1.1- 5.1.2 erwähnt, ist es vom Interesse, den Auflader am Beginn des „Übergangsregimes“ zu betreiben. Im Fall, dass ein Rohgas mit konstanter Partikelkonzentration vorliegt, lässt sich die Quenchdauer mit Hilfe von im Kapitel 2.2.7 dargestellten Zusammenhängen gut abschätzen und ein spannungsgesteuerter Aufladerbetrieb ist möglich (eine konstante Spannung wird angestrebt). Wenn allerdings die Konzentration des Rohgases sich im Laufe des Betriebes ändert, z. B. stark abnimmt, fließt bei der gleichen Betriebsspannung ein sehr hoher Strom im Elektroabscheider, was, erstens, energetisch ineffizient ist, und zweitens, ein sehr geringes c^2n^3 -Produkt zur Folge hat. In der Folge kann es dazu kommen, dass der Ladungsgewinn in der ARA-Stufe den Ladungsverlust nicht mehr abdecken kann, je nach Höhe der Ladungsverluste. In diesem Fall würde die Betriebsspannung der Kollektor-Stufe und resultierend die Gesamtabscheideleistung sinken. Das „Übergangsregime“ wird durch den steigenden Stromwert gekennzeichnet. Es ist daher sinnvoll, den Betrieb des Aufladers bei schwankenden Rohgaskonzentrationen stromgesteuert durchzuführen (konstanter Strom wird angestrebt). Der Stromwert soll sich dabei am Wiederanstieg befinden (Abbildung 5-3). Die experimentellen Ergebnisse dazu finden sich im Kapitel 6.2.1.

Die Länge des Aufladers bei einer stromgesteuerten Regelung beeinflusst die Reaktionsschnelligkeit auf die Konzentrationsschwankungen. So können in einem Auflader, der eine Verweilzeit hat, die kleiner als die Konzentrationsänderungsrate ist, auch die einzelnen Konzentrationspeaks aufgelöst werden. Dagegen bleiben solche kurzfristige Konzentrations-schwankungen von einem „langen“ Auflader unbemerkt.

5.1.4 Auswahl der Auflader-Polarität

Die Polarität der potentialfreien Elektrode ist die des Aufladers. Da der elektrische Überschlag im Bereich der Feldelektrode mit höherer Wahrscheinlichkeit von der verschmutzten Niederschlags Elektrode ausgehen kann, werden bei positiver PFE-Polarität und entsprechend negativer Polarität der von der Niederschlags Elektrode ausgehenden Entladung höhere mittlere Feldstärken erwartet.

Im gequenchten Auflader-Regime erfolgt der Überschlag im Auflader von der Niederschlags Elektrode, von daher wird durch die Verwendung der positiven Corona-Polarität die maximale Betriebsspannung nicht benachteiligt [Lüb11].

Positive Corona-Entladung ist auch im Hinblick auf die Ozonproduktion im Vergleich zur negativen zu bevorzugen.

5.2 Transport des geladenen Aerosols und begleitende Ereignisse

Das Funktionsprinzip eines ARA-Abscheiders benötigt hohe Raumladungsdichten am Eintritt in die 2.Abscheiderstufe. Das gilt insbesondere beim Hochfahren der Anlage auf die Betriebsspannung, für den weiteren Betrieb reichen auch viel niedrigere Raumladungsdichten aus. Es dürfen daher keine großen Verluste durch die Raumladungsabscheidung in der Transportleitung zwischen dem Auflader und dem ARA-Kollektor stattfinden. Bei sehr hohen Raumladungsdichten ist der Verlust von Raumladung vor dem Eintritt in die 2.Stufe dagegen von Vorteil, da sehr hohe Raumladungsdichten im Plattenpaket Entladungen hervorrufen können (Kapitel 5.3.2).

In einem gequenchten Elektroabscheider können sehr hohe partikelgebundene Raumladungsdichten erzeugt werden. Mit Hilfe von Gleichungen 2-55 - 2-57, unter Annahmen von $E_{mittel}=0,6$ MV/m und $E_{NE}=0,8$ MV/m [Lüb11], lassen sich die Raumladungsdichten für unterschiedliche Aufladerradien wie in der Abbildung 5-7 dargestellt berechnen. Es ist ersichtlich, dass Raumladungsdichten von über $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$ mit weit verbreiteten Elektroden-Konfigurationen erreicht werden können.

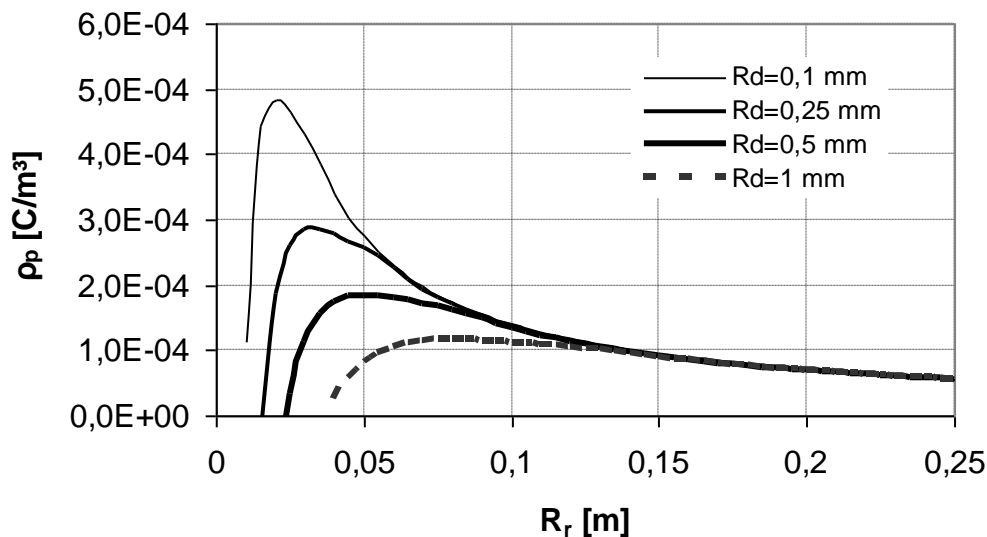


Abbildung 5-7 Maximale mittlere partikelgebundene Raumladungsdichte im gequenchten Elektroabscheider als Funktion des Rohrradius. Feldstärke im EA begrenzt durch $E_{mittel}=0,6$ MV/m, $E_{NE}=0,8$ MV/m [Lüb11]

Insbesondere bei den mehrstufigen Verfahren, wo die Aufladung und Abscheidung von Teilchen voneinander getrennt sind, kann durch eine fehlerhafte Auslegung die Selbstentladung des geladenen Aerosols auf dem Weg von der Aufladestufe zur Kollektorstufe hervorgerufen werden.

Eigene Untersuchungen zur Selbstentladung von Aerosolen werden im Kapitel 7 vorgestellt und diskutiert.

5.3 2.Stufe. ARA-Kollektor

Der ARA-Kollektor dient zur Abscheidung von hochkonzentrierten Aerosolen, die entweder bereits im Betriebsablauf im geladenen Zustand vorhanden sind, oder in der ersten Elektroabscheider-Stufe aufgeladen werden. Die ARA-Stufe besteht aus einer isolierten potentialfreien Elektrode, die je nach Aufbau auf verschiedene Weise mit einer Niederschlagselektrode gekoppelt werden kann.

Wie im Kapitel 4 bereits erwähnt, wird die potentialfreie Elektrode in zwei Bereiche unterteilt: eine Ladungs-Kollektorelektrode und eine Feldelektrode. Die Auslegungs-Grundlagen für die einzelnen Bereiche werden in diesem Kapitel dargestellt.

Bei einigen Anwendungen, bei denen keine sehr hohen Abscheidegrade benötigt werden und der Abscheider kostensparend gebaut werden soll, kann eine PFE aus Kunststoff eingesetzt werden. Der Nachteil besteht darin, dass eine gleichmäßige Verteilung des elektrischen Potentials über die Kunststoff-Oberfläche kaum zu erreichen ist. Dies kann mit einem Flüssigkeitsfilm deutlich verbessert werden, allerdings wird dabei der Stromabfluss durch das elektrostatische Abtropfen erhöht.

5.3.1 Ladungs-Kollektorelektrode

Die Funktion der Ladungs-Kollektorelektrode ist, wie im Kapitel 4 bereits erwähnt, das Sammeln von elektrischen Ladungen für die Aufladung der gesamten potentialfreien Elektrode.

Zur Aufladung der potentialfreien Elektrode dient der von den geladenen Teilchen getragene Strom

$$I_p = c \cdot n \cdot e \cdot \dot{V} = \rho_p \cdot \dot{V}. \quad 5-5$$

Die Ladungsmenge, die durch Raumladungsabscheidung in der LKE auf die PFE übergeht, kann wie folgt gefunden werden:

$$I_{p, zu} = \frac{\bar{n} \cdot e \cdot \Delta c_{LKE}}{t_{LKE}} = \frac{\Delta \rho_p}{t_{LKE}}, \quad 5-6$$

mit Δc_{LKE} - Aerosolverluste in der LKE [$1/m^3$], \bar{n} - mittleren Teilchenladung [-], t_{LKE} - Verweilzeit des geladenen Aerosols in der Kollektorelektrode [s] und $\Delta \rho_p$ - Raumladungsverluste in der LKE [C/m^3]. Unter Verwendung von Gleichung 2-72 mit Annahme idealer Quervermischung erhält man für ein monodisperses monogeladenes Aerosol

$$I_{p, zu} = \frac{n \cdot e}{t_{LKE}} \cdot \left(c_{ein, LKE} - \frac{1}{\left(\frac{1}{c_{ein, LKE}} + \frac{\bar{n}^2 \cdot e^2 \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot \varepsilon_0} \cdot t_{LKE} \right)} \right), \quad 5-7$$

mit $c_{ein, LKE}$ - Partikelkonzentration am Eintritt in die LKE [$1/m^3$].

Die Aufladung der PFE erfolgt, wenn der Ladungsgewinn größer ist als der Ladungsverlust, der durch mehrere Ereignisse wie Kriechströme über die Isolatoroberflächen, mögliche Entladungen in der Elektrodenanordnung und durch das Abtropfen der auf den Elektroden angesammelten Flüssigkeit im elektrischen Feld verursacht werden kann:

$$I_{p,zu} > I_{verlust} = I_{isolator} + I_{Entladung} + I_{Abtropfen} . \quad 5-8$$

Die Aufladezeit der Feldelektrode bis U_{FE} ist damit als

$$t_{Aufladung} \leq \frac{C \cdot U_{FE}}{\left(I_{p,zu}(U_{PFE}) - I_{isolator}(U_{PFE}) - I_{Entladung}(U_{PFE}) - I_{Abtropfen}(U_{PFE}) \right)} \quad 5-9$$

abgeschätzt werden, mit C - elektrischer Kapazität der potentialfreien Elektrode, [F].

Da die Verlustströme kaum zu berechnen sind und von der angelegten Spannung abhängig sind, kann eine Abschätzung durch die Messung von Strom-Spannungskennlinien der gesamten PFE-Anordnung erfolgen.

Da in der Regel ein sehr stark geladenes Aerosol in die Ladungs-Kollektorelektrode strömt, kann bei einer großräumigen LKE-Auslegung eine Selbstentladung des Aerosols hervorgerufen werden. Die Selbstentladung vom Aerosol in der Ladungs-Kollektorelektrode würde zum Anstieg der Auflade-Geschwindigkeit von der PFE führen.

5.3.2 Elektrohydrodynamische Effekte am Eintritt in die LKE

Das geladene Aerosol strömt gegen das Potential der Kollektorelektrode in die 2.ARA-Stufe ein. Bei manchen Konstruktionen ist eine Strömungsumlenkung denkbar, was das Umfließen der Kollektorstufe und damit die Verlangsamung der PFE-Aufladung und die Verschlechterung der Gesamtabscheidung zur Folge hat. Um dieses zu verhindern, soll der dynamische Druck des Gases am Eintritt in die Kollektorelektrode $p_d = \rho \cdot u^2 / 2$ deutlich höher als der gegenwirkende elektrische Druck $p_e = \rho_p \cdot \Delta U$, sein.

5.3.3 Elektrostatisches Abtropfen in der LKE

Die Ladungs-Kollektorelektrode ist der einzige Ort, wo die Teilchenabscheidung auf der isolierten potentialfreien Elektrode stattfindet. Das hier abgeschiedene Aerosol muss im Laufe des Betriebs von der potentialfreien Elektrode abfließen. Durch die Geometrie der LKE kann die Ablass-Stelle vorgegeben werden. Um einen Ladungstransport durch die Bildung des Elektrosprays oder durch das elektrostatische Abtropfen zu verhindern, muss der Flüssigkeitsablass in einem Bereich kleiner elektrischer Feldstärken realisiert werden. Dies wird im Weiteren am Beispiel der ARA-Laboranlage (Kapitel 6) und des Industrie-Prototyps (Kapitel 8) gezeigt.

5.3.4 Partikelabscheidung im FE-Bereich

Die Berechnungsansätze für die Partikelabscheidung im Feldelektrodenbereich wurden im Kapitel 2.2.4 vorgestellt.

Die Anwesenheit von hohen Raumladungsdichten in der Kollektor-Stufe führt zur Verzerrung der elektrischen Feldstärke zwischen den Plattenelektroden (Abbildung 5-8). Hier wird mit Raumladungsdichten gerechnet, die bei den konventionellen zweistufigen Elektroabscheidern zu erwarten sind, siehe Abbildung 5-7.

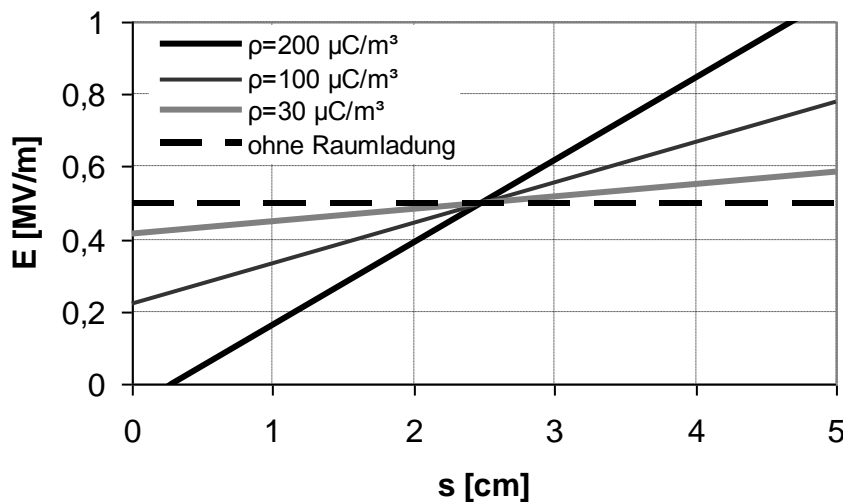


Abbildung 5-8 Feldstärke zwischen zwei Platten mit und ohne Raumladung. Plattenabstand 5 cm. Mittlere Feldstärke zwischen Elektroden 0,5 MV/m. 2-D Simulation im FemLab

Die Feldstärke wird in der Nähe der Niederschlagselektrode stark erhöht, was zur Steigung der Teilchen-Abscheiderate führt und, wie im Kapitel 5.1.4 erwähnt, zu einer von der NE ausgehenden Entladung führen kann. Bei der Raumladungsdichte von 200 μC hätte es ggf. eine Teilchenabscheidung in Richtung beider Elektroden gegeben. Je nach Verteilung der Raumladung im elektrischen Feld, wenn ein Teil des Gasvolumens bereits gereinigt wurde, kann eine Laminarisierung der Strömung erfolgen.

5.3.5 Elektrische Kapazität und Kräfte zwischen Elektroden

In den Fällen, wenn die Elektroden nur wenige Befestigungspunkte haben, z.B. aufgehängt sind, können elektrische Kräfte zwischen Elektroden ihre Bewegung und anschließende Entladung verursachen. Bei der ARA-Anlage gilt das insbesondere für den Bereich der Feldelektrode.

Die elektrische Kapazität einer Platten-Elektrodenanordnung lässt sich wie folgt berechnen:

$$C_{FE,gesamt} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A_{FE,gesamt}}{s}, \quad 5-10$$

mit $A_{FE,gesamt}$ - Gesamtfläche der Feldelektroden [m^2], s - Abstand zwischen der FE und NE [m].

Zwischen den geladenen FE und geerdeten NE wirkt eine Kraft F [N], die unter Abwesenheit vom geladenen Aerosol für eine FE-Platte als

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{U^2}{s^2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A_{FE,1} \quad 5-11$$

berechnet wird. Mit $A_{FE,1}$ - Fläche einer Feldelektrode [m²].

Der Zusammenhang zwischen Kraft und elektrischen Feldstärke zwischen zwei Elektroabscheiderplatten ist beispielhaft für 1 m² Elektrodenfläche bei 4 cm Elektrodenabstand in Abbildung 5-9 dargestellt. Im Bereich der typischen Betriebsfeldstärken (0,5-0,8 MV/m) erreichen die Kräfte einen Wert von 2 bis 3 N.

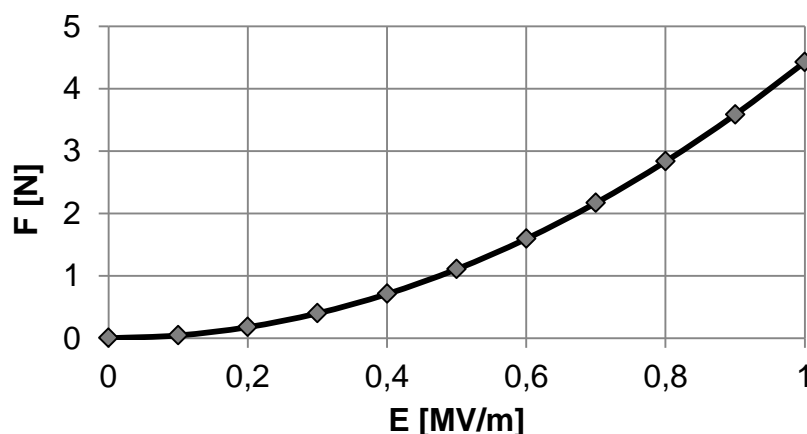


Abbildung 5-9. Die Anziehungs-Kraft zwischen zwei Plattenelektroden als Funktion der Feldstärke. Elektrodenfläche 1 m², Elektrodenabstand 0,04 m. Ohne geladenes Aerosol

5.3.6 Entladungskaskade

Eine unkontrollierte Aufladung der potentialfreien Elektrode führt zum Überschlag und zu ihrer vollständigen Entladung durch den beim Überschlag gebildeten ionisierten Kanal. Eine Möglichkeit zur Begrenzung und Einstellung der Betriebsspannung besteht in der Verwendung einer Corona-Anordnung, die die überschüssigen Ladungen von der potentialfreien Elektrode abführen kann. Die technische Realisierung kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die Corona-Anordnung kann mit in den Gasraum installiert werden oder über einen Isolator nach außen mit der PFE elektrisch verbunden werden, was die Einstellung der Betriebsfeldstärke einfacher macht. Bei einem Betrieb mit sehr hohen Spannungen (einige hundert Kilovolt) kann eine Kaskaden-Anordnung verwendet werden, um sehr hohe elektrische Potentiale über größere Abstände zu verteilen und zusätzlichen Ladungsverlust durch Oberflächenströme zu minimieren. Ein Beispiel der Realisierung und der Einstellung einer Corona-Kaskade wird in den Abbildungen 6-3 und 6-4 gezeigt.

In dem Fall, dass hohe Raumladungsdichten vorliegen, kann der elektrische Strom, der durch die raumladungsbedingte Abscheidung von Teilchen in der Ladungs-Kollektorelektrode auf die PFE zugeht, höher sein, als der Strom, der bei der gewünschten Betriebsspannung über die Entladungs-Kaskade abfließen kann. Damit führt der Anstieg der Raumladungsdichte zum Anstieg der Betriebsspannung. Solche Schwankungen der Betriebsspannung können einige Kilovolt betragen, was im Fall hoher Betriebsfeldstärken zum Überschlag führen würde.

Durch den Einsatz einer Kaskade mit einer steileren I-U-Charakteristik werden diese Risiken minimiert.

Eine bessere Einstellung der Kaskade wird mit positiver Corona-Polarität erwartet, aufgrund der besser definierten Einsatzspannung.

Ein Betrieb ohne Entladungsstrecke ist auch denkbar, der Abscheidegrad wird allerdings durch den unkontrollierten Stromfluss im Kollektor-Bereich verschlechtert.

5.3.7 Elektrische Isolation

Die elektrische Isolation ist ein wichtiger Bestandteil aller Hochspannungs-Apparate. Die Anforderungen an einen Hochspannungsisolator sind sehr anspruchsvoll: minimale Isolatordicken, dem Einsatz entsprechende Zuverlässigkeit und minimale Kosten. Materialien wie Polyethylen, Polypropylen, PVC werden aufgrund guter Verarbeitbarkeit und relativer Preiswertigkeit sehr oft eingesetzt.

Die Eigenschaften des Isolators beeinflussen den Abfluss der Ladungen von der PFE. Um den langfristigen Betrieb der ARA-Anlage zu ermöglichen, ist eine besondere Sorgfalt bei der Einrichtung der elektrischen Isolierung der potentialfreien Elektrode notwendig.

Der elektrische Strom über die Oberfläche des Isolators ist in der Regel einige Größenordnungen höher, als der Strom, der durch den Isolatorkörper fließt. Das Umgebungsmedium, vor allem die Feuchte, ist der entscheidende Faktor [Mca91, Mcl65, Saa84]. In der Regel wird die Gültigkeit des Ohm'schen Gesetzes angenommen. Es wird zwischen den Oberflächen, wo die Feuchte einerseits in der Form der einzelnen Tropfen und andererseits in der Form eines kontinuierlichen Flüssigkeitsfilms aufgesammelt werden kann, unterschieden. Im ersten Fall ist die Oberflächenleitfähigkeit gering und von der relativen Feuchte fast unabhängig. Im zweiten Fall ist die Oberflächenleitfähigkeit klar definiert und steigt mit der relativen Feuchte [Mcl65]:

$$\rho_{ob} = G_F \cdot \frac{l_F}{b_F}, \quad 5-12$$

mit G_F - Leitwert des Filmes [S], l_F - Länge des Films [m] und b_F - Filmbreite [m].

Zwar repräsentiert dieser Wert nicht die tatsächliche Oberflächenleitfähigkeit des Dielektrikums, sondern die des Feuchtigkeitsfilms. Dieser Wert hängt von dem Absorber ab und wird auf das Material bezogen. Diese Definition vernachlässigt die Leitfähigkeit des Isolatorkörpers [Mca91].

Untersuchungen und Berechnungsansätze zur Ladungsinjektion und zur elektrischen Leitung über Isolatoroberflächen sind in [Pep98] zu finden.

Der Überschlag durch das Isolationsmedium wird durch die Durchbruchfeldstärke charakterisiert. Für die üblichen Polymere liegt sie im Bereich zwischen 1 und 9 MV/cm [Ied80]. Die Überschlagsspannung eines Isolators hängt von vielen Isolator-Parametern wie Geometrie, Material, Oberflächenbehandlung, Art der Verbindung zur Elektrode, auch von der Form der angelegten Spannung und von der Umgebungsart ab. Die Untersuchungen dazu sind in [Mil93, Hew63, Vla95] zu finden.

Die Kunststoffisolatoren und Hochspannungseinführungen sind gegen den Überschlag über die Isolatoroberfläche anfällig. Der Überschlag über die Isolatoroberfläche wird in der Regel am „dreifachen“ Punkt initiiert, wo Isolator, Elektrode und die Umgebung in unmittelbarer Nähe zueinander sind [Mil93, Mil89, Pep98]. Die Mechanismen, die zum Oberflächen-

Überschlag führen, sind die Elektronenkaskade und die Bildung sekundärer Elektronenlawinen [Mil89].

Das typische pre-Breakdown Phänomen durch den Isolatorkörper ist das sog. „Treeing“ [Ied80, Eic76, Zel87]. Das ist eine Beschädigung des Dielektrikums, die durch die elektrische Belastung entsteht und durch Bildung baumförmiger Kanäle im Dielektrikumskörper gekennzeichnet wird.

Das Entstehen von „Bäumen“ verläuft meistens unter Anwesenheit von partiellen Entladungen [Kre93], auch unter Anwesenheit von Feuchte und Verschmutzungen, und findet meistens recht langsam statt. Beim impulsartigen Anlegen hoher Spannungen kann dieser Vorgang auch sehr schnell verlaufen.

Dieses Ereignis, abhängig von erwähnten Entstehungsbedingungen, kann sowohl auf der Oberfläche, als auch im Inneren des Dielektrikums auftreten. Ein wichtiger Faktor ist der Zugang von „Bäumen“ zur freien Luft oder zur Wasser-Umgebung [Eic76]. Die „Bäume“, die auf den freien Oberflächen mit einem unbeschränkten Zugang zu Luft oder Wasser ihren Anfang finden, können durch den ganzen Dielektrikum-Körper wachsen und die Elektroden überbrücken. Im Fall, wenn der Baum seinen Anfang in einem Hohlraum oder durch eine Verschmutzung im Inneren des Dielektrikums findet, bleibt das Ausmaß vom „Treeing“ meistens klein.

Die Mechanismen, die zur Bildung eines Kanals führen können, sind je nach den Bedingungen sehr unterschiedlich. Die gebildeten Kanäle, die durch das Zersetzen des Dielektrikum-Mediums entstehen, sind hohl und können die Feuchtigkeit eindringen lassen und damit den Strom durchleiten. Das sind die sogenannten „Wasserbäume“. Das Eindringen der Flüssigkeit wird durch Elektrophorese und Dielektrophorese bedingt. Durch die Bildung partieller Entladungen an den Spitzen des „Baumes“ wird UV-Licht produziert, welches zum weiteren Zersetzen von Kunststoff führt. Die Bildung von „elektrischen Bäumen“ wird durch lokale Erwärmung an den Stellen mit hoher elektrischer Belastung und entsprechender Kompression, Materialermüdung durch den ständigen Polarisationswechsel (Wechselspannung), durch „heiße Elektronen“ verursacht [Eic76, Ied80].

Um das Entstehen von Kanälen zu verhindern oder zu stoppen, werden die Hohlräume mit Öl oder Gas, die eine hohe Durchschlagfestigkeit haben (z.B. SF_6 oder N_2), gefüllt [Nit78, Eic76, Saa84].

Angesichts der oben genannten Probleme können die Hochspannungseinführungen entsprechend dem Einsatzgebiet mit Heizung [Ohl95] oder Luftspülung [Tak84, Kou85, Rus84, Sch06, Rec93, Rau82] ausgestattet werden, um den Zugang von dem zu reinigenden Abgas zur Isolatoroberfläche zu vermeiden und das Absetzen von Feuchte zu verhindern [Cas01, Whi63].

Die Keramik- und Glasisolatoren besitzen zwar eine sehr gute chemische Beständigkeit, haben aber ein großes Gewicht und sind bei hohen Vibrationen brüchig. Die Isolatoren aus Kunststoff sind deutlich billiger, leichter, haben eine bessere Verarbeitbarkeit. Die ARA-Laboranlage wird mit durch Luft gespülten Glasisolatoren ausgestattet. Die Beurteilung der Isolation wird im Kapitel 6.2.6 durchgeführt. Beim ARA-Prototyp werden deutlich vereinfachte Isolatoren aus Polyamid eingebaut. Untersuchungen dazu sind im Kapitel 8.1.5 zu finden.

6 Laboranlage für 1000 m³/h

6.1 Versuchs- und Messaufbau

6.1.1 Laboranlage für 1000 m³/h

Das ARA-Konzept wird im zweiten Schritt in Form einer großen Laboranlage mit Durchsatz bis 1000 m³/h implementiert. Der Aufbau wird entsprechend dem Kenntnisstand entworfen, um eine möglichst gute Kombination von Herstellungsaufwand und Funktionalität zu erzielen. Der praktische Einsatz steht im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Das Fließbild der gesamten Versuchsanordnung wird in der Abbildung 6-1 dargestellt. Das mittels Aerosolgenerator hergestellte Aerosol gelangt zuerst in eine Kondensationsstrecke, wo die gewünschte Konzentration und die Partikelgröße durch die Änderung der Aerosolverweilzeit und der Dosierung vom Paraffinöl eingestellt werden (Abbildung 7-2). Das resultierende Testaerosol wird im weiteren Verlauf durch den Auflader und anschließend durch den ARA-Kollektor geleitet.

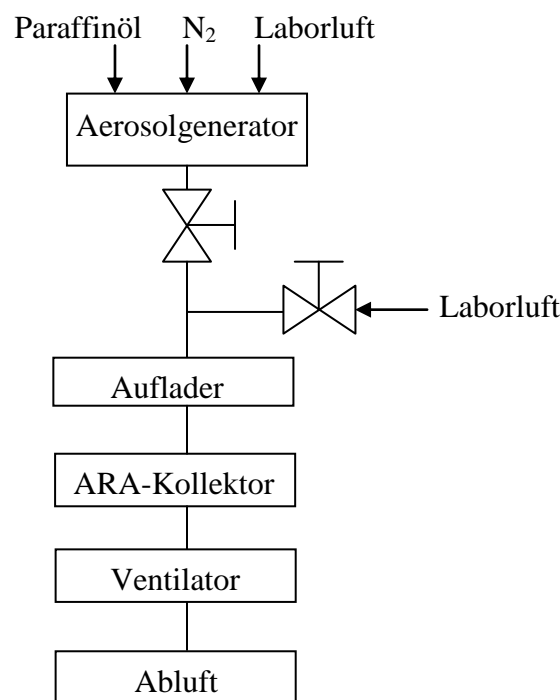


Abbildung 6-1 Fließbild der Versuchsanordnung

Die Laboranlage besteht aus zwei Stufen: Auflader und ARA-Kollektor. Sie sind in der Abbildung 6-2 einzeln dargestellt.

Der Auflader besteht aus vier parallelgeschalteten Draht-Rohr-Elektroabscheidern, die einen rechteckigen Querschnitt haben. Die rechteckige Bauweise ist günstig und lässt die Ausnutzung des ganzen Anlagenvolumens zu. Als Nachteil kann eine kleinere maximale mittlere Raumladungsdichte angesehen werden, da die maximale Betriebsspannung durch den kürzesten Abstand zwischen den Elektroden bestimmt wird. Der Abstand Draht-Wand beträgt 5 cm. Die Sprühdrahte werden auf den Metallstangen befestigt, die mit Hilfe von Glasisolatoren vom Gehäuse isoliert sind. Die effektive Länge des einzelnen Abscheiders ist

1,6 m. Der Drahtdurchmesser ist 0,5 mm. Die Verweilzeit im Auflader bei 1000 m³/h beträgt 0,23 s.

Der Auflader wird mit dem ARA-Kollektor mit einer Rohrleitung ($d=0,2$ m) verbunden. Die Leitungslänge beträgt ca. 1,5 m.

Die ARA-Stufe besteht im Großen aus zwei abwechselnd angeordneten Elektrodenpaketen, die sich in einem 2 x 1 x 0,8 m großen rechteckigen Gehäuse befinden: eine Reihe von potentialfreien Plattenelektroden (8 Stück) wird auf den Glasisolatoren aufgehängt, die geerdeten Niederschlagselektroden (7 Stück) werden am Boden des Gehäuses aufgestellt. Der Plattenabstand liegt aus fertigungstechnischen Gründen bei 5 cm. Die Plattenabmessungen: 1,7 x 0,7 m; Plattendicke 1,5 mm. Die Gesamtabscheidefläche beträgt 21,42 m². Die Verweilzeit in der Abscheidezzone ist 4,6 s. An die Elektrodenkanten wurden rohrförmige Profile mit $d=1$ cm angeschweißt, um die Erhöhung der Feldstärke zu minimieren. Die trichterförmige Kollektorelektrode mit eingebauten Strömungsverteilern wird mechanisch (und somit elektrisch) mit dem potentialfreien Elektrodenpaket verbunden. Die Verweilzeit in der Kollektorelektrode bei 1000 m³/h ist 0,45 s.

Die elektrischen Isolatoren bestehen aus Glas und werden mit Druckluft gespült (Abbildung 6-5).

Der Luftstrom wird mit einem Radialventilator mit einem Frequenzumrichter erzeugt und gesteuert.

Die Vorrichtungen für die berührungslose Potentialmessung der PFE und für den kontrollierten Feldaufbau in dem ARA-Kollektor werden in nachfolgenden Kapiteln dargestellt. Die Aerosolgenerator, Aerosolverdünner u.a. werden genauer in Kapiteln 6.1.2 – 6.1.3 beschrieben.

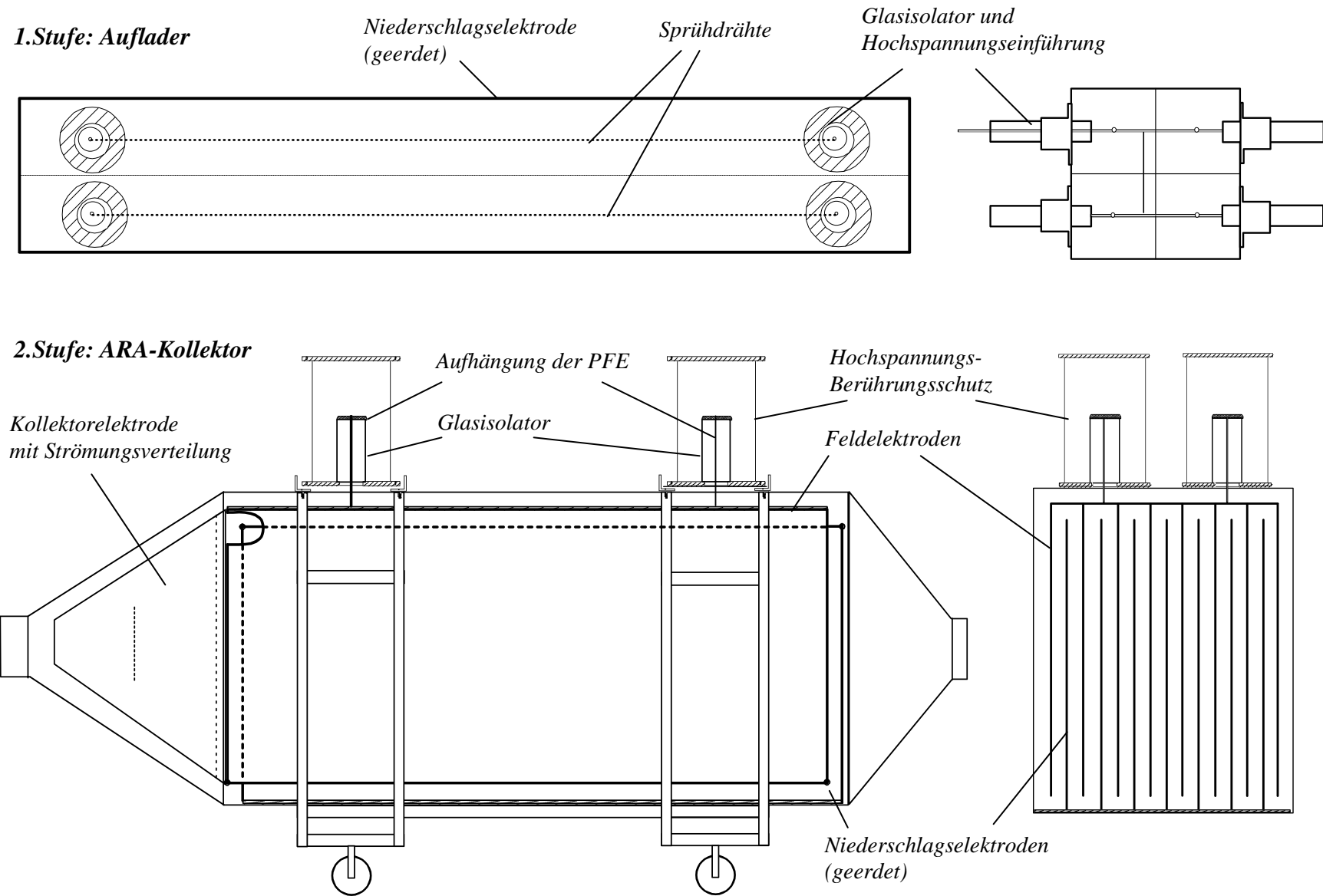


Abbildung 6-2. Laboranlage für 1000 m³/h

Entladungskaskade

Die technische Realisierung der Corona-Entladestrecke ist Abbildung 6-3 dargestellt. Die Entlade-Strecke wird über ein Hochspannungskabel mit der Elektrodenaufhängung elektrisch verbunden und befindet sich außerhalb vom Versuchsaufbau. Die Verbindung wird im mit Druckluft gespülten Isolator-Schutzgehäuse realisiert. Die Corona-Kaskade besteht aus vier Gliedern, die jeweils eine Einsatzspannung von ca. 6 kV haben. Die Kaskadenglieder sind in einem Glasrohr mit gleichen Abständen verteilt. Durch die Verstellung der passiven Elektrode des letzten Kaskadenglieds wird die Gesamteinsatzspannung der Entladestrecke eingestellt (Abbildung 6-4). Die resultierende Einsatzspannung von 25 kV entspricht der gewünschten Betriebsspannung.

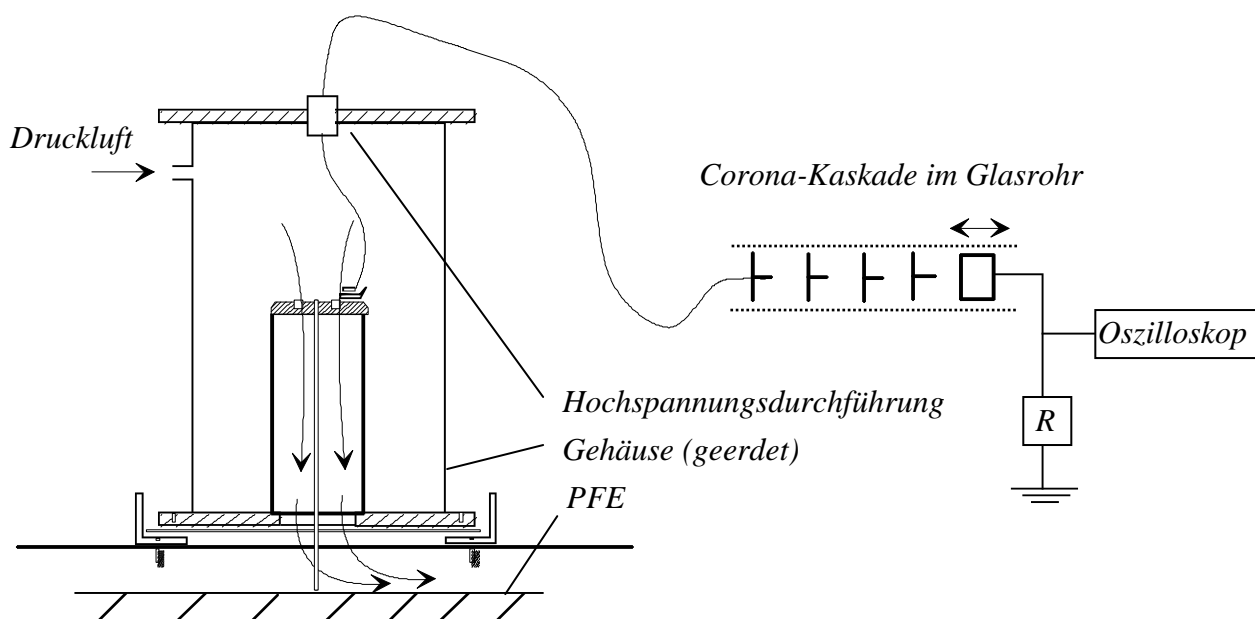


Abbildung 6-3 Prinzip-Schema der Überschussladungsabfuhr von der PFE mit einer Corona-Kaskade

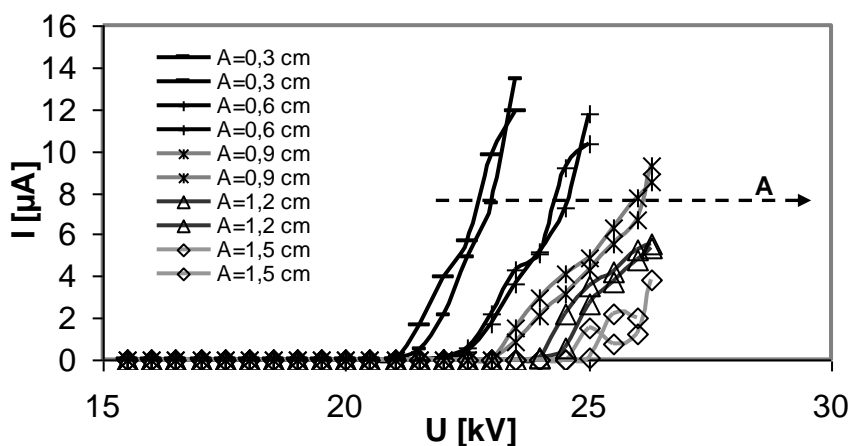


Abbildung 6-4. Gemessene Strom-Spannungskennlinien bei unterschiedlichen Abständen zwischen Elektroden des letzten Kaskadenglieds. Corona-Kaskade aus vier Gliedern

Messung des elektrischen Potentials der PFE

Die Potentialmessung der PFE erfolgt mit Hilfe eines elektrostatischen Voltmeters ISOPROBE® Modell 244 der Fa. MONROE ELECTRONICS. Das Voltmeter erlaubt eine berührungslose Messung elektrischer Potentiale bis ± 3000 V mit einer Genauigkeit von 0,1 V. Mittels des Softwarepakets LabView lässt sich der Verlauf des elektrischen Potentials mit einer Auflösung von einer Messung pro Sekunde aufzeichnen.

Die Messsonde des elektrostatischen Voltmeters wurde in dem Deckel des Schutzgehäuses des Isolators installiert und befand sich auf einem überslagssicheren Abstand von einigen Zentimetern von der metallischen Aufhängung der potentialfreien Elektrode (Abbildung 6-5)

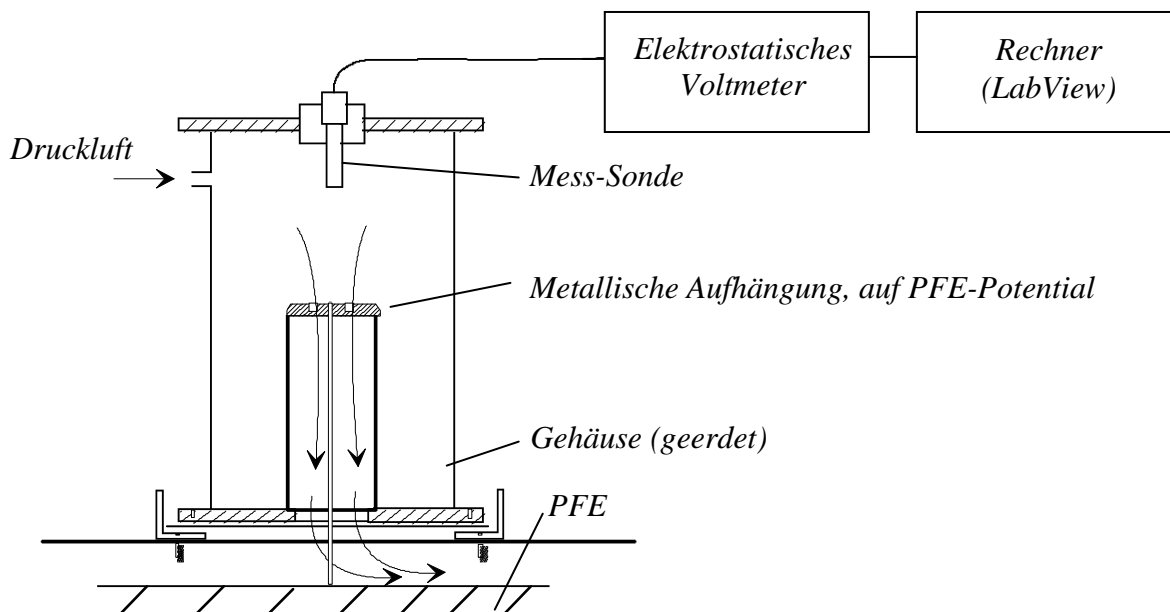


Abbildung 6-5 Messschema des elektrischen Potentials der potentialfreien Elektrode

Da der für eine Messung vorausgesetzter Abstand zwischen der Messsonde und der Messoberfläche (einige Millimeter) mehrfach überschritten wird, muss durch das manuelle Anlegen der Spannung an die PFE eine Kalibrierung durchgeführt werden. Ein Beispiel der Kalibrierung des elektrostatischen Voltmeters ist in Abbildung 6-6 zu finden. Das aus der Kalibrierungskurve ermittelte lineare Verhältnis zwischen den gemessenen und realen Spannungswerten dient der weiteren Datenauswertung.

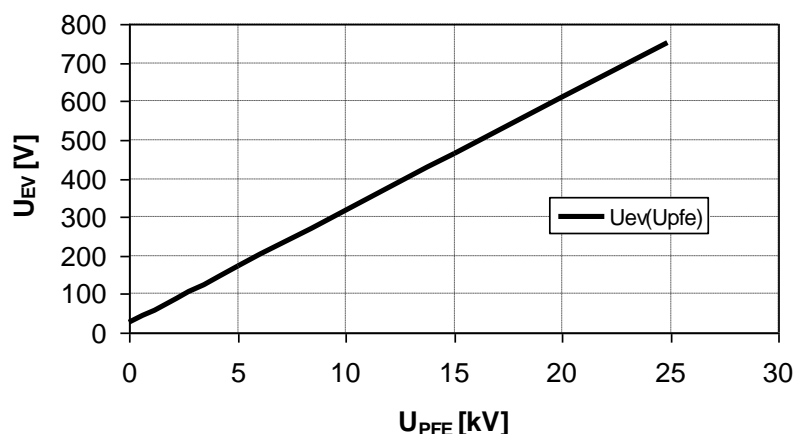


Abbildung 6-6 Kalibrierung des elektrostatischen Voltmeters

Optimierung der Strömungsverteilung in der 2.Stufe

Für eine optimale Partikelabscheidung im Bereich der Feldelektroden soll eine gleichmäßige Strömungsverteilung gewährleistet werden. Für diesen Zweck werden Strömungsverteiler in die trichterförmige Ladungs-Kollektorelektrode eingebaut.

Die Strömungsgeschwindigkeiten in der ARA-Stufe werden über den Anlagenquerschnitt am Austritt aus dem Plattenpaket mit Hilfe eines thermischen Anemometers der Fa. Lambrecht ermittelt. Die Übersicht der Messstellen befindet sich in der Abbildung 6-7.

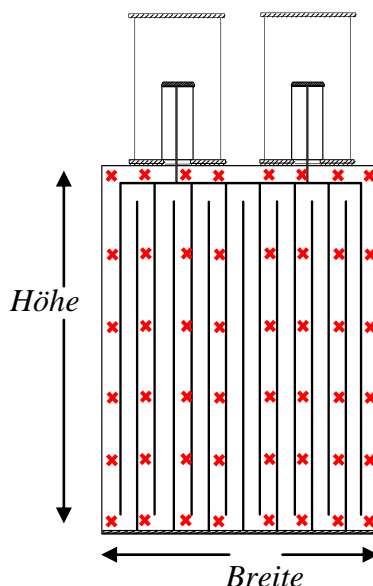


Abbildung 6-7 Messstellen zur Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten in der ARA-Stufe

Die technische Realisierung der Strömungsverteilung erfolgt mittels zweier Lochbleche. Das kleine Lochblech mit der relativen Öffnung von 50% wird am Eintritt in die Ladungskollektor-Elektrode installiert, das große Lochblech mit rel. Öffnung von 30% am Austritt aus der LKE. Die verwendeten Lochblech-Anordnungen sind in der Abbildung 6-8 dargestellt.

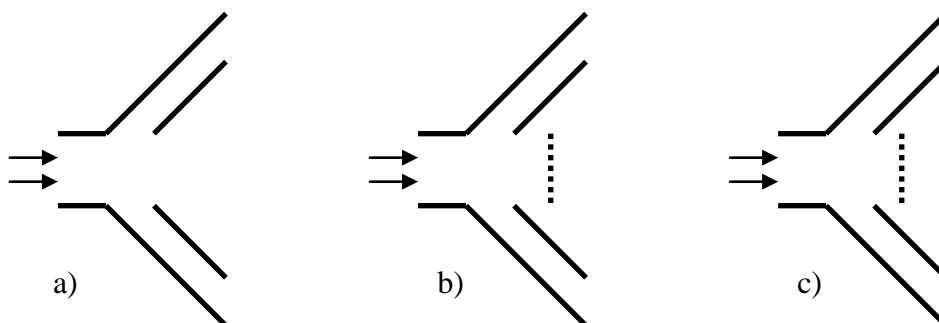


Abbildung 6-8 Anordnungen der Verteiler-Bleche

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Plattenpaket beträgt 0,35 m/s. Die ermittelten Strömungsprofile werden anhand der geometrischen Standardabweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten beurteilt:

- a) $\sigma = 1,12$; Strömungs-Rezirkulation wird beobachtet
- b) $\sigma = 0,63$
- c) $\sigma = 0,2$

Im Weiteren wird mit der Anordnung „c“ gearbeitet.

6.1.2 Testaerosol

In Bezug auf die beabsichtigte Anwendung des ARA-Verfahrens wird für die Testversuche ein sehr hochkonzentriertes nanoskaliges flüssiges Aerosol benötigt.

Für die Experimente wird ein Paraffinöl-Kondensationsaerosol erzeugt. Im Gegensatz zur Zerstäubung ist auf diese Weise hergestelltes Aerosol elektrisch neutral. Es wird ein dickflüssiges Paraffinöl verwendet. Siedetemperatur liegt bei 300 °C. Die Dichte beträgt 890 kg/m³. Die Dielektrizitätskonstante ist 2,2. Es wird mit Aerosol-Anzahlkonzentrationen von bis zu 10¹⁴ 1/m³ gearbeitet.

Aerosolgenerator

Der Aerosolgenerator besteht im Wesentlichen aus einem Stickstoff-Vorwärmer und einem Aerosolverdampfer (Abbildung 6-9). Das N₂-Inertgas wird verwendet, um die Verbrennung vom Öl in der Verdampfungskammer zu verhindern. Im Stickstoffvorwärmer wird der Stickstoff auf 400 °C erwärmt ($\dot{V}_{N_2} = 1$ m³/h) und wird zur Zerstäubung von Paraffinöl in der Zweistoffdüse genutzt. Anschließend wird das zerstäubte Öl auf die Kupferschüttung gesprüht und verdampft dort. Am Austritt aus dem Verdampfer kondensiert während der Vermischung mit kalter Umgebungsluft ein sehr feines und hochkonzentriertes Aerosol.

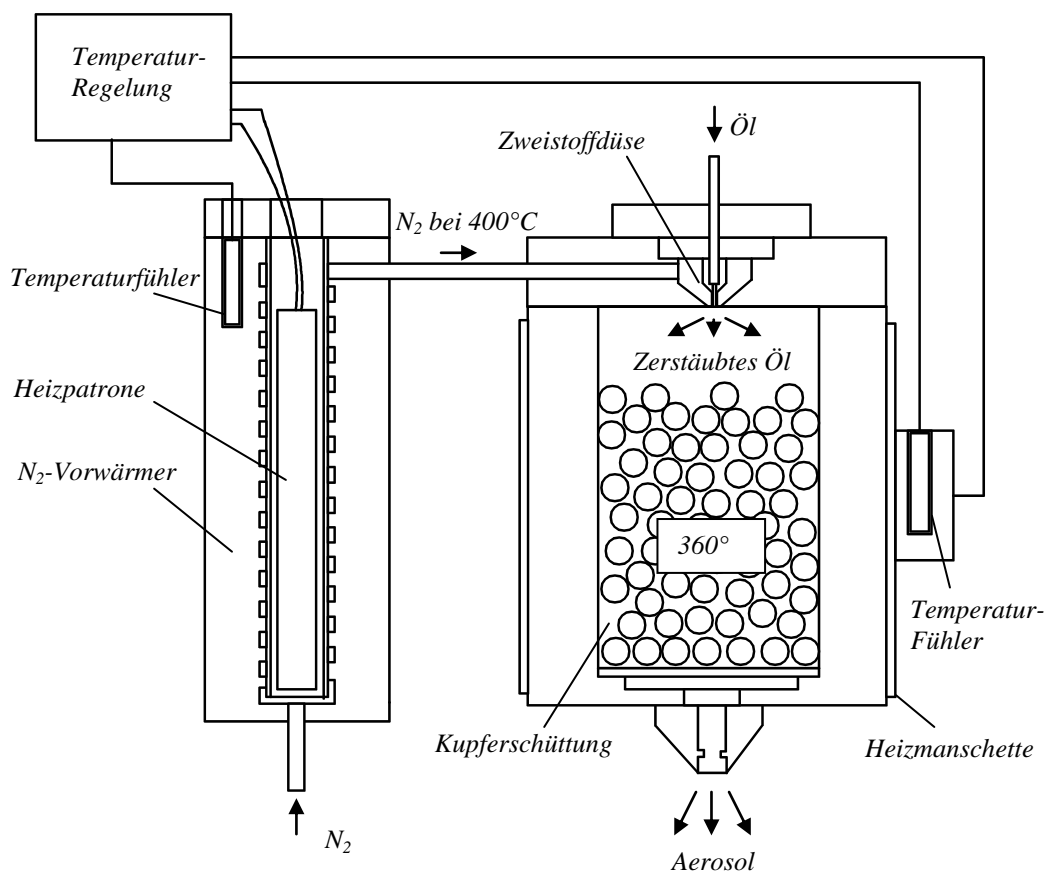


Abbildung 6-9 Aerosolgenerator für hochkonzentrierte Aerosole (bis 1 l/h Flüssigkeitsdurchsatz)

Der entwickelte Aerosolgenerator erlaubt die Erzeugung von Aerosolen mit einem Massenstrom bis 1 kg/h.

Einstellung von Größenverteilungen des Testaerosols

Die vorhandenen Kondensationsstrecke und Aerosolgenerator erlauben eine breite Konzentrationseinstellung bei der mittleren Teilchengröße von ca. 120 nm (Abbildung 6-10). Bei einem Durchsatz der ARA-Anlage von 1000 m³/h wird dadurch eine bis 25-fache Änderung der Aerosolkonzentration ermöglicht.

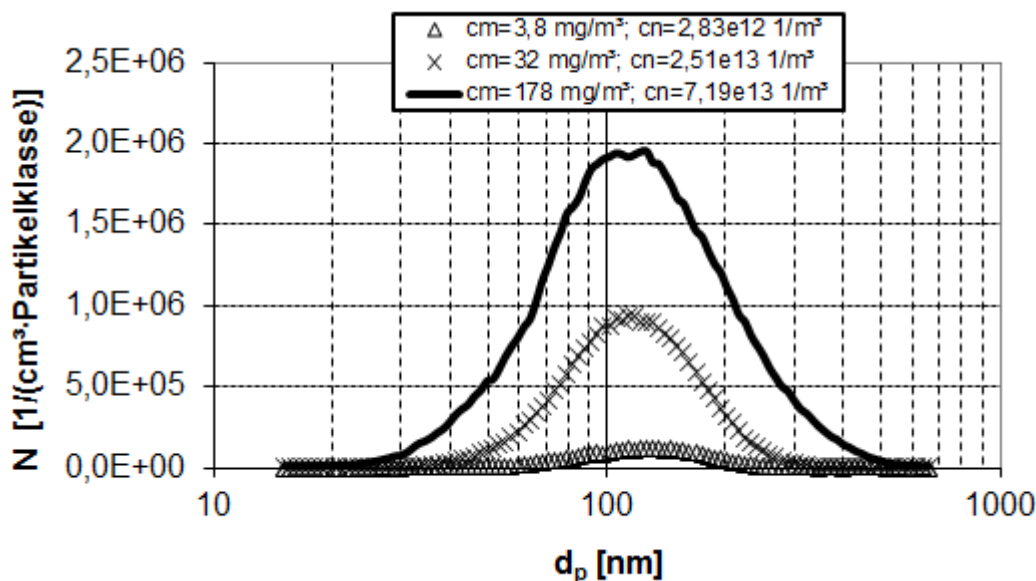


Abbildung 6-10 Testaerosole. Einstellung der Partikelkonzentration und Partikelgröße mittels Verweilzeitstrecke. Volumenstrom 1000 m³/h

6.1.3 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Das Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) ist der Kern der verwendeten Partikelmessstechnik. Das SMPS erlaubt die Messung von Partikelgrößen-Verteilungen im Bereich von $3 \text{ nm} \leq d_p \leq 1000 \text{ nm}$.

Das Gerät besteht im Wesentlichen aus einem Impaktor, einem Aerosolneutralisator auf der Basis einer Kr-85-Quelle, einem Differential Mobility Particle Analyser (DMA) und einem Kondensationspartikelzähler (CPC). Der Impaktor dient zur Abscheidung größerer Teilchen, die außerhalb vom Messbereich liegen, und zur Bestimmung des Aerosolvolumenstroms (durch Messung des Druckverlustes). Der Neutralisator dient zum Aufbau eines bekannten Ladungszustandes des Aerosols. In dem DMA werden Teilchen einer bestimmten elektrischen Mobilität von dem restlichen Aerosolstrom getrennt. Anschließend gelangen diese Teilchen in den CPC und werden dort gezählt.

Ermittlung der Verteilung der elektrischen Teilchenmobilität mit SMPS

Wird der radioaktive Neutralisator aus dem Messkreis herausgenommen und wird das unneutralisierte Aerosol in das DMA geleitet, so kann die Verteilung der elektrischen Teilchenmobilität ermittelt werden.

Für die Auswertung werden die unbearbeiteten SMPS-Messdaten verwendet, die in Form der Rawcounts (Rohzählungen von Teilchen [1/m³]) als Funktion der Messzeit erfasst werden. Die elektrische Teilchenbeweglichkeit wird wie folgt berechnet:

$$Z_p(t) = Z_p(U_{\min}) \cdot \exp \left[-\ln \left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}} \right) \cdot \frac{t - t_f}{t_{upscan}} \right], \quad 6-1$$

mit

$$Z_p(U_{\min}) = \frac{\dot{V}_{Sheath} \cdot \ln(r_a/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot L_{DMA} \cdot U_{\min}}. \quad 6-2$$

Dabei ist U_{\min} - Anfangsspannung am DMA [V], U_{\max} - Endspannung am DMA [V], t_{upscan} - Messzeit [s], t_f - interne Verzögerungszeit [s], \dot{V}_{Sheath} - Volumenstrom im DMA [m³/s], r_a - DMA Außenradius [m], r_i - DMA Innenradius [m], L_{DMA} - DMA Länge [m].

Verweilzeiteffekte im SMPS

Bei den Messungen mit dem SMPS sind sehr lange Verweilzeiten von den Aerosolresten in inneren Leitungen und im radioaktiven Neutralisator zu beachten. Insbesondere bei den abwechselnd erfolgenden Messungen, wenn die gemessenen Konzentrationen sich um einige Größenordnungen voneinander unterscheiden (wie Roh- und Reingas, verdünnte und nicht verdünnte Aerosole), können dadurch große Messfehler auftreten.

Eine Messreihe wird exemplarisch in der Abbildung 6-11 gezeigt.

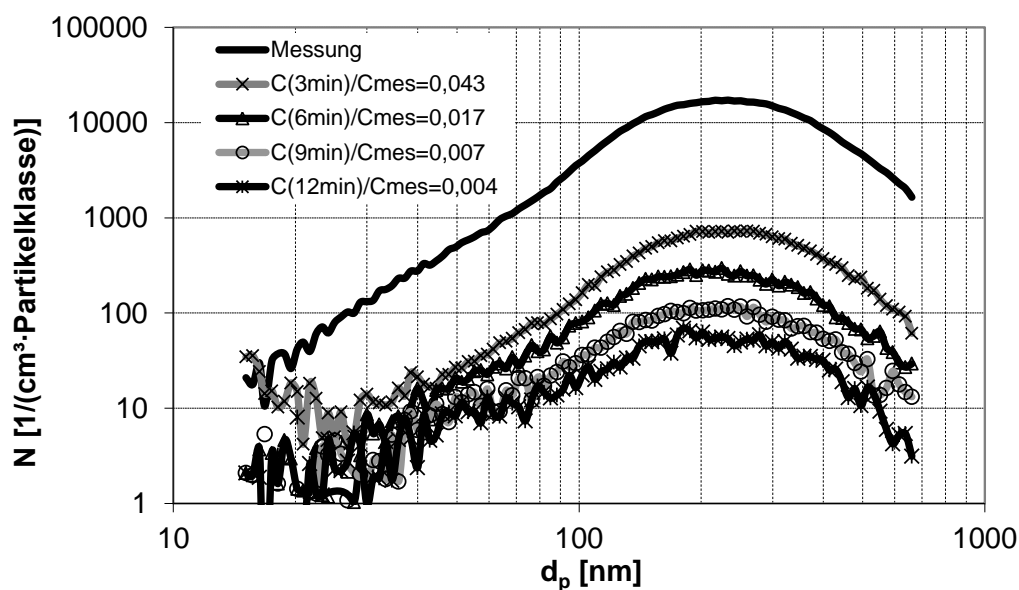


Abbildung 6-11 Messung der restlichen Partikelkonzentration in den SMPS-Leitungen mit der Zeit

Nach einer Aerosolmessung (im Diagramm als Datenreihe „Messung“ definiert) wurde die Laborluft, die durch ein HEPA-Filter vollständig gereinigt wurde, gemessen. Es ist ersichtlich, dass sogar 12 Minuten nach der ursprünglichen Messung noch 0,4% von der ursprünglich gemessenen Gesamtkonzentration in den Geräteleitungen vorhanden sind.

Im Hinblick auf dieses Ergebnis werden die SMPS-Messungen in der Reihenfolge steigender Konzentration durchgeführt und entsprechende Wartezeiten werden eingehalten.

6.1.4 Messung hoch konzentrierter geladener Aerosole. Aerosolverdünnung

Eine genaue Messung von hochkonzentrierten geladenen Aerosolen erfordert die Anwendung von speziellen Maßnahmen und Techniken. Die Teilchenverluste durch Koagulation und elektrostatische Dispersion spielen dabei eine entscheidende Rolle und hängen von der Aerosolverweilzeit ab.

Die Messung von hochkonzentrierten Aerosolen erfordert eine Verdünnung. Der Messbereich des SMPS wird durch die maximale Zählrate des CPC, die bei 10^4 1/(cm³·Partikelklasse) liegt, und durch die maximale Gesamtkonzentration von etwa 10^6 1/cm³ begrenzt. Um den beabsichtigten Arbeits-Konzentrationsbereich von bis zu 10^8 1/cm³ abzudecken, wurde eine Kreislaufverdünnungs-Vorrichtung gebaut und kalibriert (Abbildung 6-12).

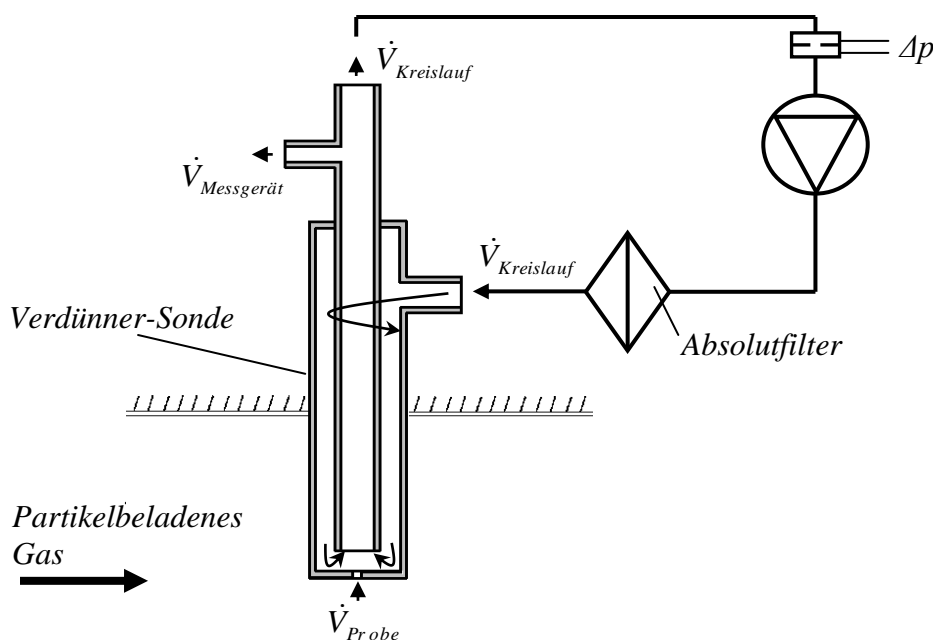


Abbildung 6-12 Kreislaufverdünner

Die im geschlossenen Kreislauf gepumpte Luft wird mit einem Absolutfilter gereinigt und in die Verdünnungs-sonde eingeführt. Die Sonde verfügt über zwei Ausgangs-Öffnungen. An eine davon wird das Messgerät angeschlossen ($d = 4$ mm). Wird für die Messung ein Aerosolvolumen aus dem Kreislauf entnommen, so wird das gleiche Volumen des unverdünnten Aerosols durch die zweite Öffnung ($d = 2$ mm) in den Kreislauf zugeführt, mit der Kreislauf-luft vermischt und somit verdünnt:

$$\dot{V}_{\text{Messgerät}} = \dot{V}_{\text{Aerosolprobe}} \quad , \quad 6-3$$

$$\text{Verdünnungsfaktor} = \frac{\dot{V}_{\text{Kreislauf}} - \dot{V}_{\text{Aerosolprobe}}}{\dot{V}_{\text{Aerosolprobe}}} \quad 6-4$$

Der Volumenstrom im Kreislauf wird mittels der Δp -Messblende erfasst. So ein Aufbau hat auch den Vorteil, dass die Aerosoleintrittsöffnung sich nicht unbemerkt zusetzen kann.

Bei der Messung wird die Verdünnersonde in den Gasstrom eingeführt. Auf diese Weise findet die Verdünnung innerhalb von einigen Millisekunden statt (bei einem $\dot{V}_{\text{Mess}} = 0,3 \text{ lpm}$ und $\dot{V}_{\text{Kreislauf}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt die Verweilzeit des Aerosols vor der Verdünnung 2,5 ms und die Verweilzeit des verdünnten Aerosols im Kreislauf 70 ms).

Anhand der Kalibrierung der Verdünnungseinrichtung wurden die in der Abbildung 6-13 dargestellten Verdünnungsfaktoren gemessen. Die Kalibrierung erfolgte mit verschiedenen Δp -Werten, der Volumenstrom wurde nicht berechnet. Die Modellverteilung ist auch im Diagramm abgebildet. Im Weiteren wurde mit einem Verdünnungsfaktor von 115 gearbeitet.

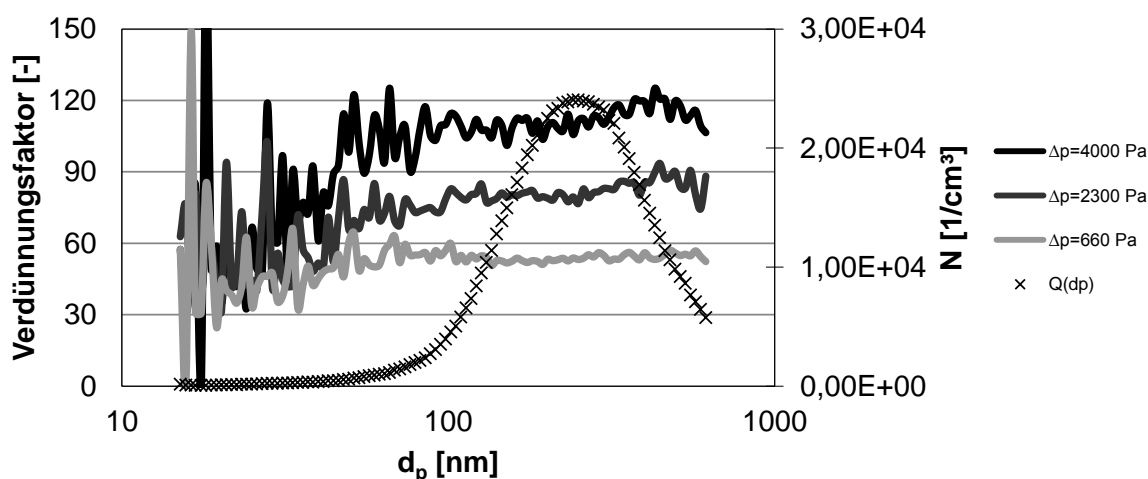


Abbildung 6-13 Gemessene Verdünnungsfaktoren

Anderer Vorteil der Kreislaufverdünnung besteht darin, dass der zu verdünnende Probestrom mit dem bereits mit Öldämpfen gesättigten Kreislaufstrom vermischt wird, so dass die eventuellen Fehler durch das Verdampfen von Öltröpfen minimiert werden.

Ein anderer Ansatzpunkt ist die Verwendung von leitfähigen Schläuchen für die Probeleitung. Die Partikelabscheidung in Kunststoffschläuchen kann zu erheblichen Messfehlern führen [Szy85].

Die Aerosolverluste durch die elektrostatische Dispersion lassen sich gut abschätzen (siehe Kapitel 2.2.8). Da die Messungen von den Raumladungsdichten und Partikelgrößenverteilungen an der gleichen Messstelle erfolgen, können die Raumladungsverluste in den Messleitungen mit Hilfe von der Gleichung

$$\rho_0 = \frac{n \cdot e}{\frac{n \cdot e}{\rho(t)} - \frac{n^2 \cdot e^2 \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p \cdot \epsilon_0} \cdot t} \quad 6-5$$

berechnet werden. Als t [s] wird die Verweilzeit in der Messleitung eingesetzt, n - mittlere Ladung pro Partikel, d_p - mittlere Teilchengröße [m].

6.1.5 Radioaktives Faraday-Cup Elektrometer

Für die Messung der partikelgetragenen Raumladungsdichten kommt ein am Lehrstuhl vorhandenes radioaktives Faraday Cup Elektrometer zum Einsatz [Lüb11] (Abbildung 6-14). Der Kern des FCE ist eine Am-231 Quelle. Das geladene Aerosol wird durch das FCE geleitet und neutralisiert. Der elektrische Strom vom Gehäuse der radioaktiven Quelle wird mit einem Elektrometer (Fa. Keithley, Model 6514E) gemessen.

Durch solchen Aufbau kann die Raumladungsdichte des Aerosols gemessen werden, ohne dass dessen Partikelgrößenverteilung beeinflusst wird.

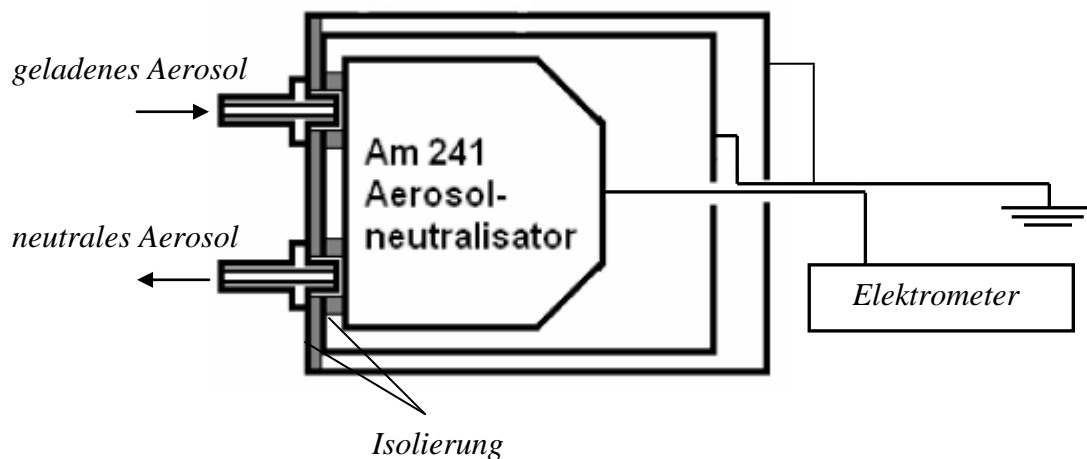


Abbildung 6-14 Prinzip-Schema des radioaktiven FCE [Lüb11]

6.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

6.2.1 Untersuchungen zum stromgesteuerten Aufladerbetrieb

6.2.1.1 I-U Kennlinien des Aufladers

Für die Experimente zum stromgesteuerten Aufladerbetrieb werden mittels der Kondensationsstrecke Testaerosole verschiedener Anzahlkonzentrationen erzeugt, die ähnliche Größenverteilungen haben (Abbildung 6-10).

Die Messung der Stromspannungskennlinien erfolgt hochspannungsseitig mit Hilfe eines Hochpräzisions-Netzteils PNC 30000-20ump der Fa. Heinzinger. Die den Testaerosolen entsprechenden Strom-Spannungs-Kennlinien sind in der Abbildung 6-15 dargestellt.

Bei der höchsten Aerosolkonzentration von 178 mg/m^3 wird die Einsatzspannung scheinbar von 11,3 auf 14 kV erhöht. Tatsächlich handelt es sich um Corona-Quenching mit einer stark reduzierten Stromaufnahme.

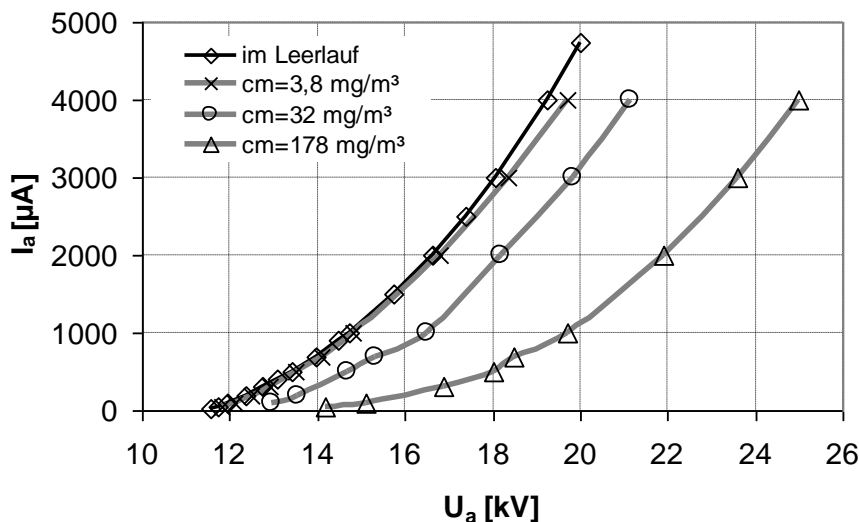


Abbildung 6-15 I-U-Kennlinien des Aufladers bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{h}$; Drahtradius $0,25 \text{ mm}$; Abstand Draht-Wand 5 cm ; Aufladerlänge $6,4 \text{ m}$; Verweilzeit im Auflader $0,23 \text{ s}$

6.2.1.2 Parameterwechselwirkungen bei einem stromgesteuerten Aufladerbetrieb

Während des stromgesteuerten Auflader-Betriebs wird ein konstanter Strom durch den Elektroden-Zwischenraum angestrebt. Dabei ändert sich entsprechend der Partikelanzahl und der Partikelladung der Spannungswert. Die Raumladungsdichte und Teilchenladung am Austritt aus dem Auflader sind für die Aufladung der PFE von Bedeutung.

Die Abbildung 6-16 zeigt die gemessenen Raumladungsdichten am Austritt aus dem Auflader bei verschiedenen Auflader-Strömen und Aerosolkonzentrationen. Die Verteilungen der Testaerosole sind in der Abbildung 6-10 zu finden. Bei der Teilchenkonzentration von $7,19 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$ wird eine hohe Raumladungsdichte von über 60 µC/m^3 gemessen. Bei der kleinsten Partikelkonzentration beträgt die partikelgebundene Raumladungsdichte nur wenige µC/m^3 .

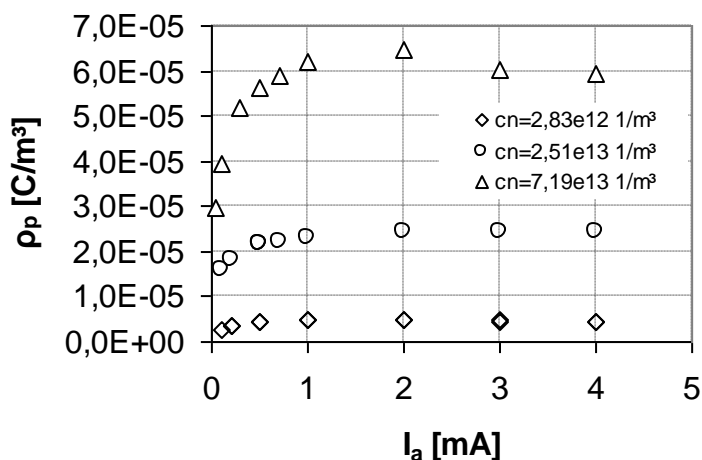


Abbildung 6-16 Raumladungsdichte am Austritt aus dem Auflader bei verschiedenen Stromwerten und Aerosolkonzentrationen. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{h}$; Drahtlänge $6,4 \text{ m}$; Drahtradius $0,25 \text{ mm}$; Abstand Draht-Wand 5 cm

Die Abbildung 6-17 zeigt gemessene mittlere Teilchenladung bei verschiedenen Aufladerströmen. Es ist bemerkenswert, dass die mittlere Ladung pro Partikel bei höchster Anzahlkonzentration etwas höher ist, als die bei der mittleren. Das kann mit steigender Felddaufladung erklärt werden, da bei hoher Aerosolkonzentration für den gleichen Strom eine viel höhere Spannung angelegt werden muss.

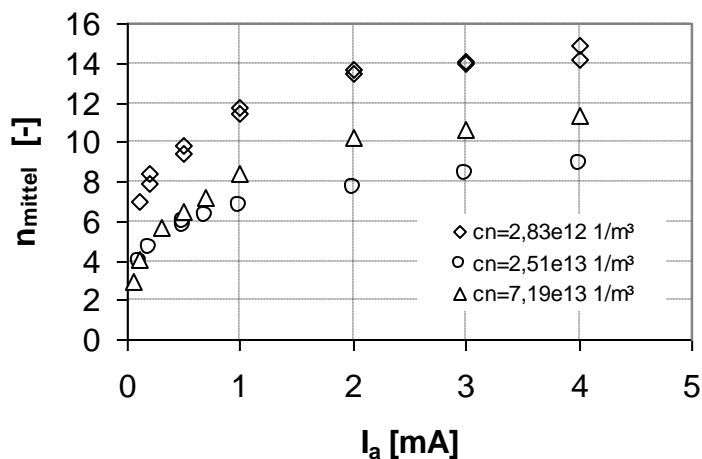


Abbildung 6-17 Mittlere Teilchenladung am Austritt aus dem Auflader bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Stromgesteuerter Betrieb. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{s}$; Drahtlänge $6,4 \text{ m}$; Drahtradius $0,25 \text{ mm}$; Abstand Draht-Wand 5 cm

Die Abbildung 6-18 zeigt Raumladungsdichten am Austritt aus dem Auflader bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Die Raumladungsdichten weisen eine starke Zunahme im Leistungs-Bereich von 0 bis 50 J/m^3 . Mit steigender Leistung wird eine fast konstante Raumladungsdichte beobachtet, was auf den Betrieb des Aufladers im Übergangsbereich hindeutet.

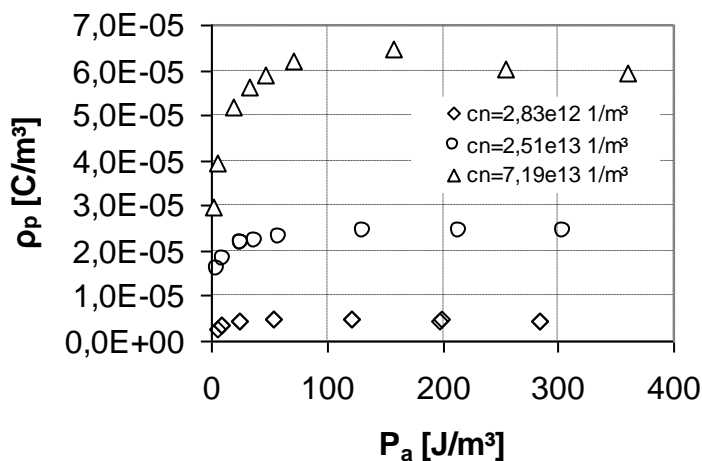


Abbildung 6-18 Raumladungsdichte am Austritt aus dem Auflader bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Stromgesteuerter Betrieb. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{s}$; Drahtlänge $6,4 \text{ m}$; Drahtradius $0,25 \text{ mm}$; Abstand Draht-Wand 5 cm

6.2.1.3 Aufladung der PFE

Das Experiment erfolgt nach dem in der Abbildung 6-5 dargestellten Schema. Die potentialfreie Elektrode wird zuerst manuell auf Erdpotential gelegt. Nach dem Start des Datenerfassungsprogramms wird die PFE wieder an die Entladungskaskade angeschlossen und der Anstieg des Elektrodenpotentials wird ermittelt. Die gemessenen Verläufe des elektrischen Potentials für verschiedene Aerosolkonzentrationen sind in der Abbildung 6-19 dargestellt. Die Verteilungen der Testaerosole werden in der Abbildung 6-10 gezeigt.

Der Versuch bei $c_m=3,8 \text{ mg/m}^3$ und $c_n=2,82 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^3$ zeigt, dass die Aufladung der PFE auch bei sehr kleinen Aerosolkonzentrationen stattfindet. Allerdings ist die Aufladung extrem langsam, sodass die Betriebsspannung von 25 kV erst nach einigen Stunden erreicht würde. Das Experiment wurde aus diesem Grund vor dem Erreichen der Betriebsspannung abgebrochen. Im Fall einer kurz- oder langzeitigen Konzentrationssenkung während des Betriebes würde der für die Einhaltung der Betriebsspannung der PFE notwendige Ladungsgewinn gewährleistet.

Bei $c_m=32 \text{ mg/m}^3$ und $c_n=2,51 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$ wird die Betriebsspannung innerhalb weniger Minuten erreicht. Bei höchster Konzentration $c_m=178 \text{ mg/m}^3$ und $c_n=7,19 \cdot 10^{13}$ werden die 25 kV innerhalb von einigen zehn Sekunden erreicht.

Generell wird bei allen Aerosolkonzentrationen gleich am Beginn der Aufladung ein deutlich schnellerer Anstieg der Spannung beobachtet. Dies ist auf die anfangs auch im Feldelektrodenbereich stattfindende Raumladungsabscheidung zurückzuführen.

Anhand der Gleichung für elektrostatische Dispersion (Gleichung 5-9) lassen sich die Aufladungszeiten wie in Tabelle 1 dargestellt berechnen. Die Berechnung erfolgt mit einer Verweilzeit in der LKE von 0,5 s, der mittleren Partikelgröße von 120 nm und mittlerer Teilchenladung entsprechend Abbildung 6-17. Die berechneten Aufladezeiten unterscheiden sich deutlich von den gemessenen. Der Grund dafür ist die Annahme einer homogenen Ladungsverteilung für die Berechnung der Aufladezeit. Real ist die Verteilung inhomogen und die Abscheiderate in der Transportleitung ist damit deutlich höher als erwartet.

U_a [kV]	25	23,6	22	19,7	18,5	17,9	16,9	15,1	14,2
I_a [mA]	4	3	2	1	0,7	0,5	0,3	0,1	0,05
t [s]	5,25	5,15	4,81	4,98	5,29	5,65	6,53	11,03	22,31

Tabelle 1 Berechnete Aufladezeiten der PFE bei verschiedenen Aufladerströmen. Massenkonzentration 178 mg/m³; Volumenstrom 1000 m³/h; Betriebsspannung 25 kV; mittlerer Teilchendurchmesser 120 nm

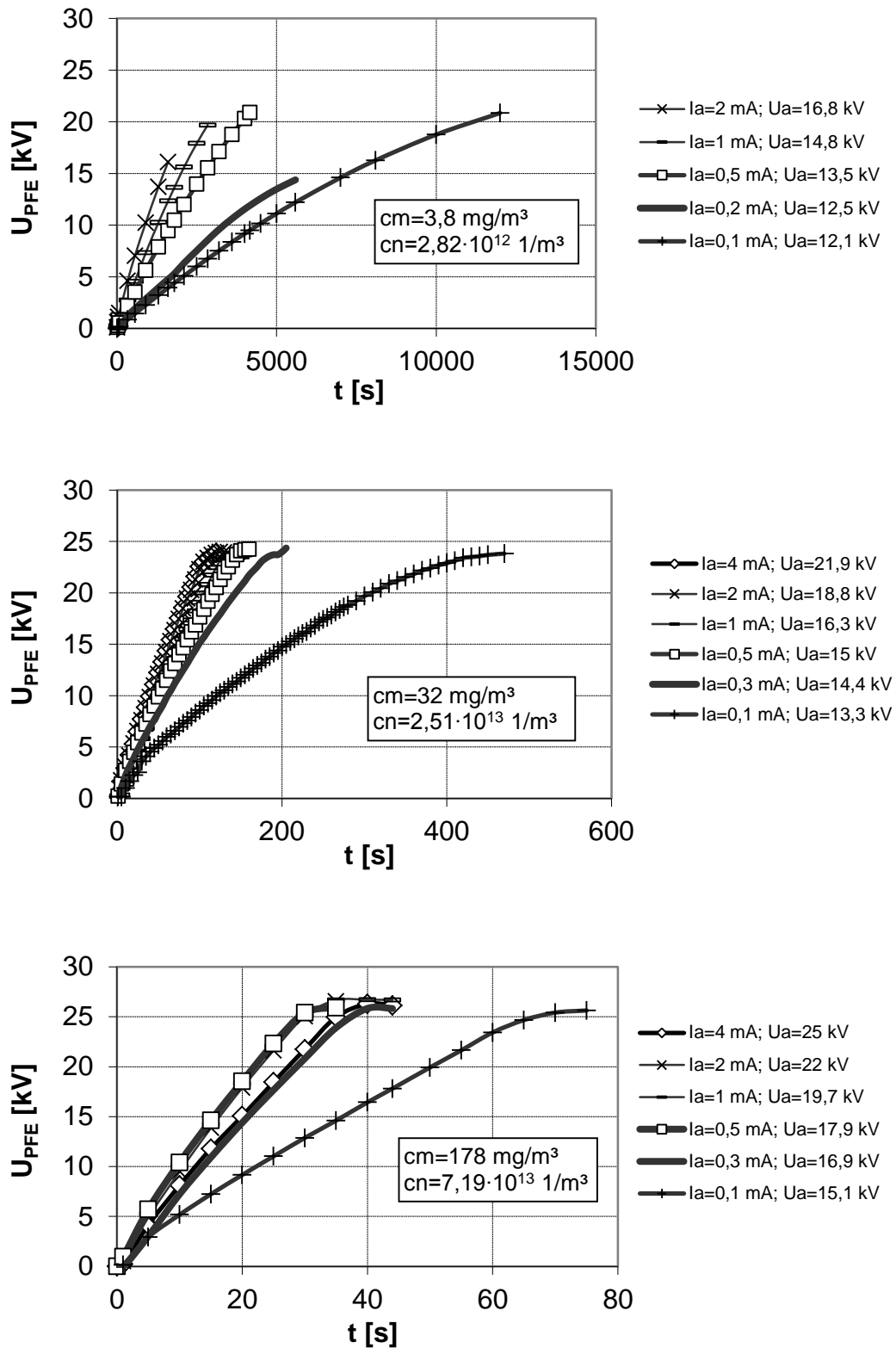


Abbildung 6-19 Aufladung der PFE bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Einsatzspannung der Entladestrecke 25 kV; Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{h}$

6.2.1.4 Messung der Raumladungsdichte an der Rohrwand eines Elektroabscheiders mit rechteckigem Querschnitt

Die Raumladungsdichte in einem gequenchten Draht-Rohr-Elektroabscheider hängt, wie im Kapitel 2.2.7 (Gleichung 2-55) erwähnt, von der angelegten Spannung und dem Rohrradius ab. Um das Gleichungssystem eines gequenchten Rohr-Draht-Elektroabscheiders bei einem rechteckigen Abscheiderquerschnitt verwenden zu können, wird bei den Berechnungen der Radius eines Rohres eingesetzt, der die gleiche Querschnittsfläche wie der Querschnitt des Rechtecks hat (Äquivalentradius, Abbildung 6-20). Es wird davon ausgegangen, dass die Raumladungsdichte wegen der starken Quervermischung durch turbulente Strömung und den elektrischen Wind sich nur minimal über den Rohrquerschnitt unterscheidet.

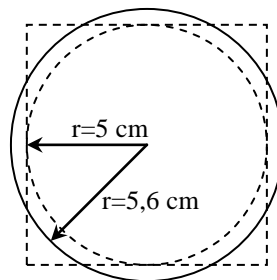


Abbildung 6-20 Äquivalentradius für die Berechnung des rechteckigen Auflader-Querschnitts

Die Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22 zeigen die gemessenen Raumladungsdichten am Austritt aus dem Auflader, ermittelt an den verschiedenen Rohrwandsegmenten (Messstellen entsprechend der Abbildung 6-23). Die Messungen erfolgten mit zwei Aerosolkonzentrationen: $c_m = 32 \text{ mg/m}^3$, $c_n = 2,51 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$ und $c_m = 178 \text{ mg/m}^3$, $c_n = 7,19 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$. Die schwarze und die graue durchgezogenen Linien zeigen die theoretischen Raumladungsdichten, berechnet entsprechend für $r_R = 5 \text{ cm}$ und $r_R = 5,6 \text{ cm}$.

Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass sich die theoretischen und gemessenen Raumladungsdichten bei hohen ΔU deutlich unterscheiden, was dem Betrieb des Aufladers bei höheren Spannungen im „Übergangsbereich“ entspricht. Die an verschiedenen Rohrwandsegmenten ermittelten Raumladungsdichten weichen voneinander, wie erwartet, nur minimal ab und liegen im Mittel an der mit $r_R = 5,6 \text{ cm}$ theoretisch berechneten Geraden. Dieses Ergebnis zeigt, dass unter Verwendung des Äquivalentradius die Berechnung von rechteckigen Auflader-Querschnitten analog zu den rohrförmigen erfolgen kann.

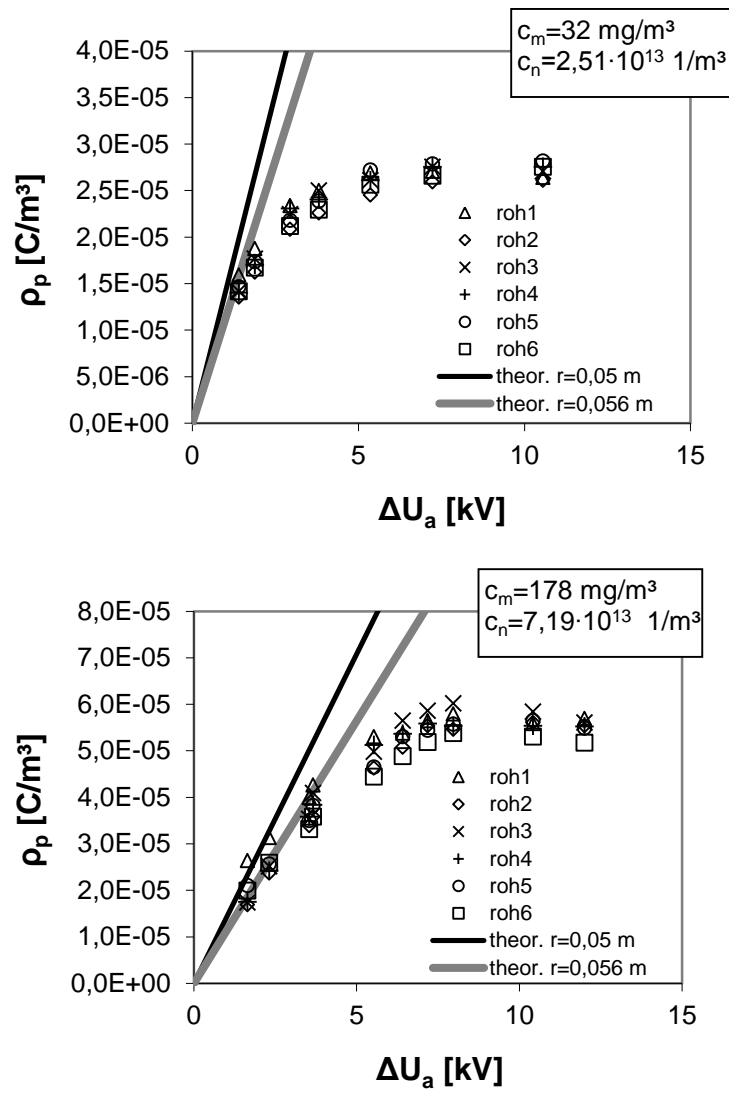


Abbildung 6-21 Raumladungsdichte am Austritt aus dem Auflader. Gemessen an den Probe-
stellen roh1 – roh6 bei $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Oben: Massenkonzentration 32 mg/m^3 , Anzahl-
konzentration $2,51 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$. Unten: Massenkonzentration 178 mg/m^3 , Anzahlkonzentration
 $7,19 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$

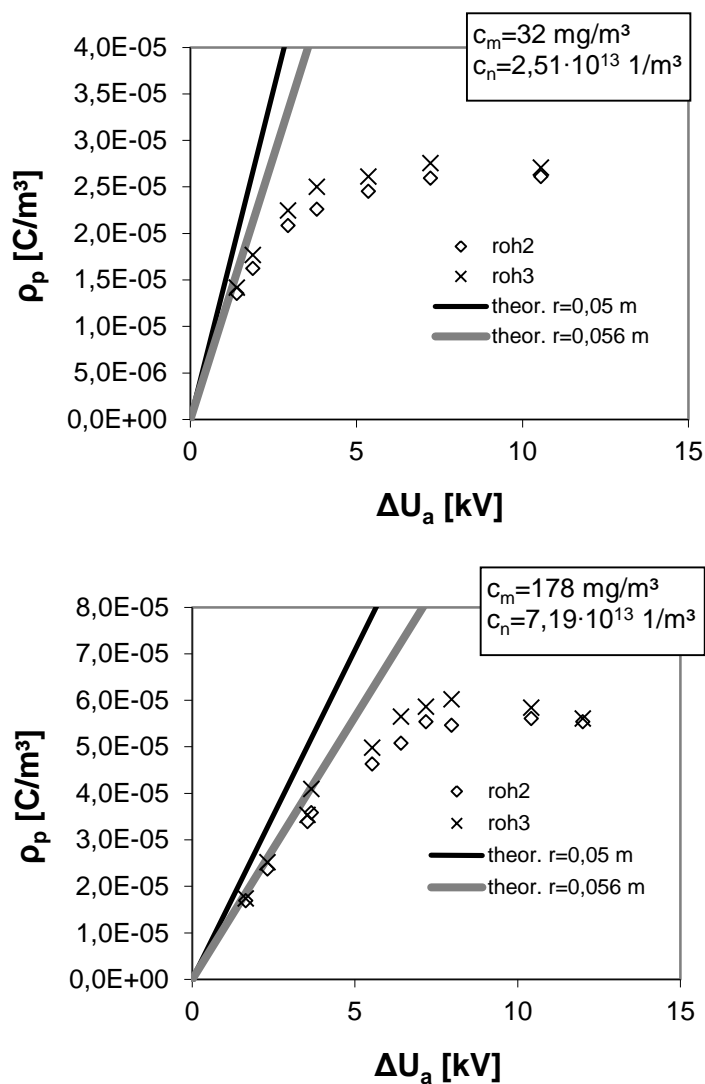


Abbildung 6-22 Raumladungsdichte am Austritt aus dem Auflader. Gemessen an den Probestellen roh2 und roh3 bei 1000 m³/h. Oben: Massenkonzentration 32 mg/m³, Anzahlkonzentration $2,51 \cdot 10^{13}$ 1/m³. Unten: Massenkonzentration 178 mg/m³, Anzahlkonzentration $7,19 \cdot 10^{13}$ 1/m³

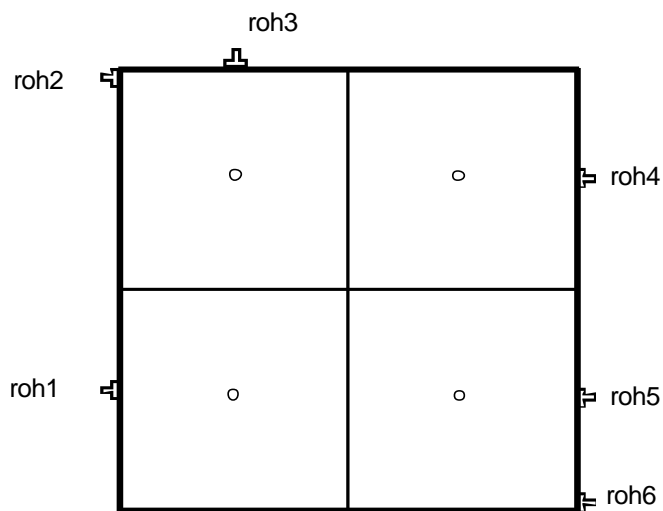


Abbildung 6-23 Auflader-Querschnitt mit angebrachten Messstellen

6.2.1.5 Konzentration und mittlere Teilchenladung am Austritt aus dem Auflader. Vergleich mit dem Modell von Lübbert

Aus den am Austritt aus dem Auflader gemessenen Partikelgrößenverteilungen und Raumladungsdichten werden die Aerosolgesamtkonzentration und die mittlere Teilchenladung pro Teilchen ermittelt. In der Abbildung 6-24 werden die gemessenen Daten für verschiedene Auflader-Betriebsparameter im Vergleich mit den nach dem Modell von Lübbert berechneten Daten gezeigt. Die Berechnung erfolgt mit dem Äquivalentradius von 5,6 cm. Verglichen werden die Ergebnisse für ein niedrigkonzentriertes Aerosol (oben auf dem Bild) und ein hochkonzentriertes Aerosol (unten auf dem Bild).

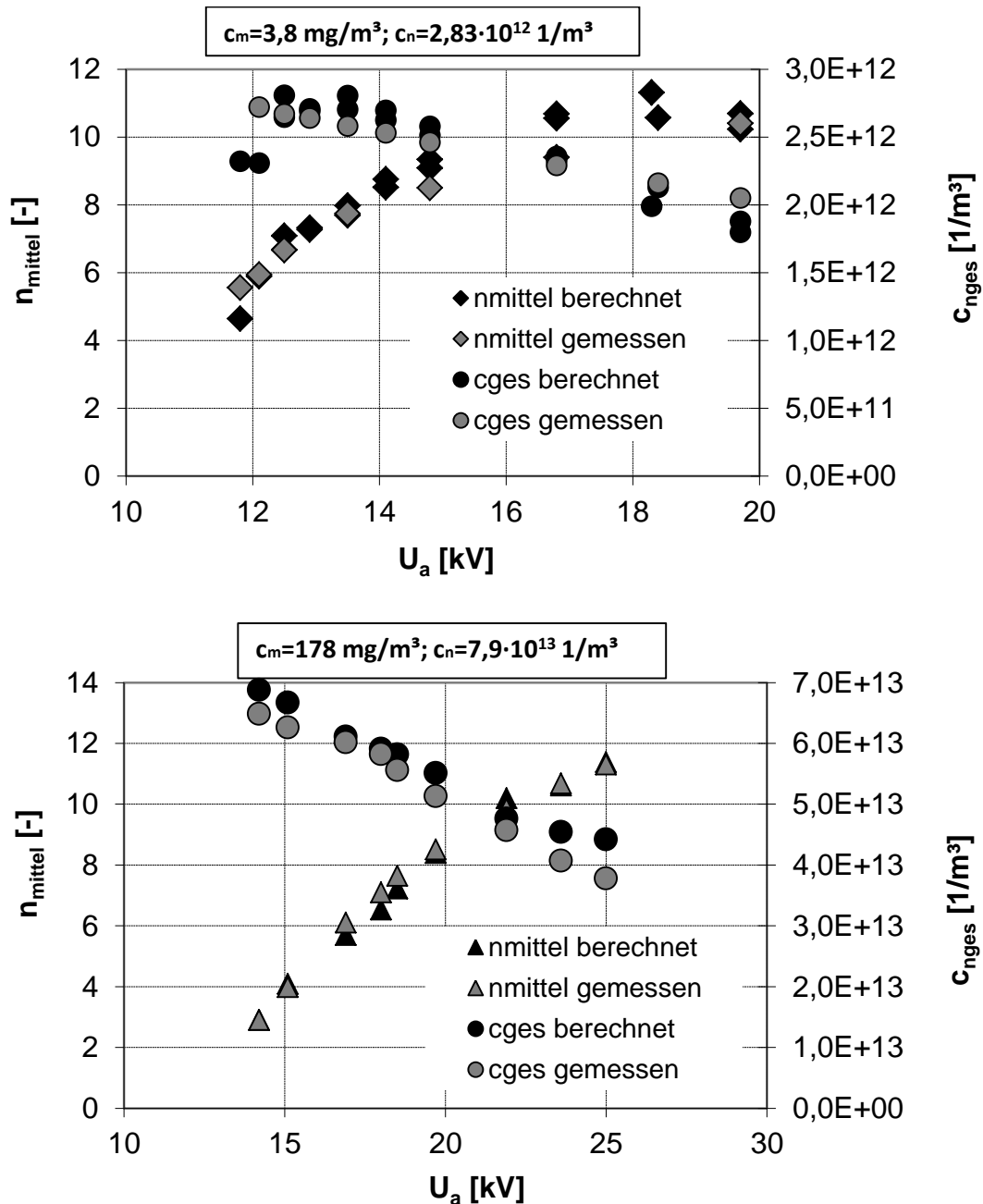


Abbildung 6-24 Gemessene und nach dem Modell von Lübbert [Lüb11] berechnete Partikelgesamtkonzentrationen und mittlere Teilchenladung bei unterschiedlichen Auflader-Spannungen. Rohrradius 0,056 m; gerechnet mit sechs Partikelklassen; Verweilzeit im Auflader 0,23 s; Einsatzspannung 11,3 kV

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten sowohl für das Quench- als auch für das Übergangs-Regime des Aufladers.

6.2.2 Mobilitätsmessungen

Ein ausführliches Bild der Vorgänge in der Kollektorstufe kann durch die Messungen der Verteilung der elektrischen Teilchenmobilität gewonnen werden (Kapitel 6.1.3). Die Messungen erfolgen nach dem in der Abbildung 6-25 dargestellten Schema. Das Aerosol, das im Auflader positiv aufgeladen wird, wird unneutralisiert mit negativem DMA erfasst.

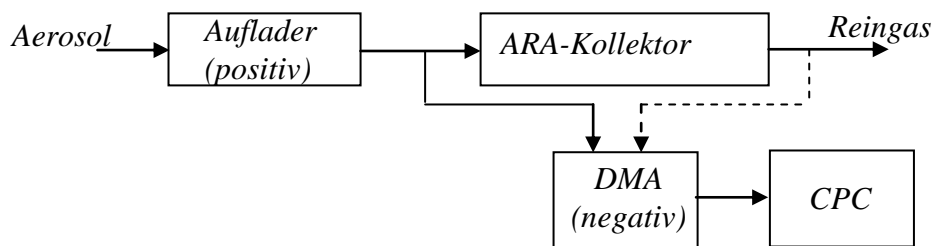
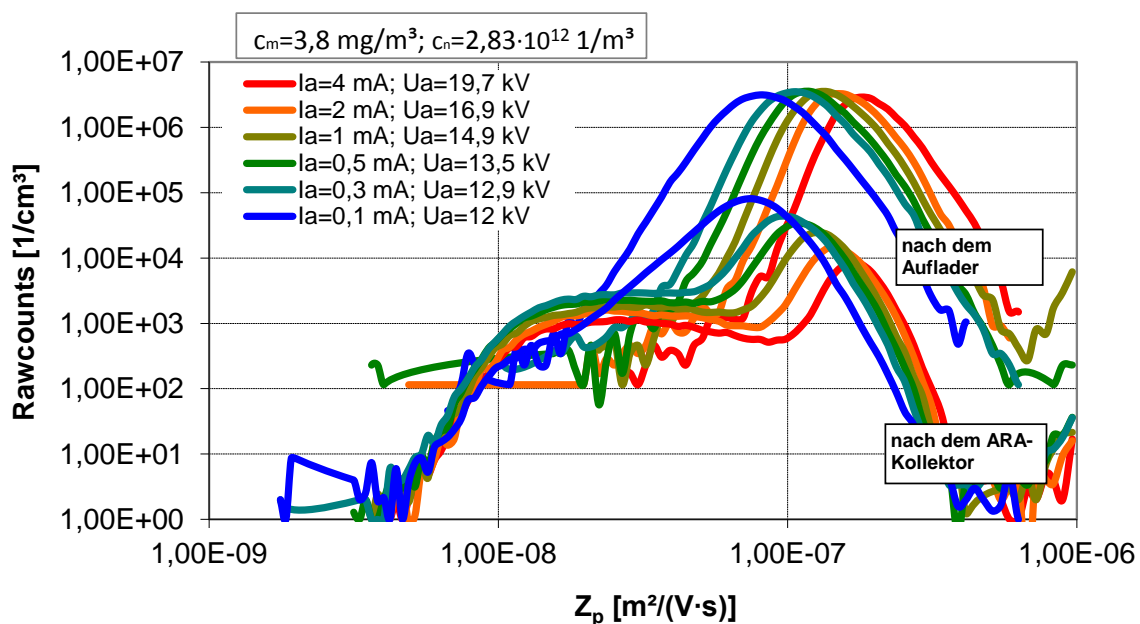


Abbildung 6-25 Messschema der Mobilitätsverteilungen

Die gemessenen Mobilitätsverteilungen unterschiedlich konzentrierter Aerosole vor und nach der ARA-Kollektorstufe werden in der Abbildung 6-26 in doppellogarithmischer Skalierung dargestellt. Insbesondere bei den Messungen von hochkonzentrierten Aerosolen fällt auf, dass die Verteilungen, die nach dem Auflader und nach dem Kollektor ermittelt wurden, im Bereich kleiner elektrischer Mobilitäten ($10^{-8} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) sich deutlich überschneiden. Das weist auf die Entstehung wenig mobiler Teilchen in der Kollektor-Stufe hin. Die Ursache dafür können die Entladungen im Plattenpaket und die Aerosol selbstentladung sein. Weitere Untersuchungen hierzu werden im folgenden Kapitel dargestellt.



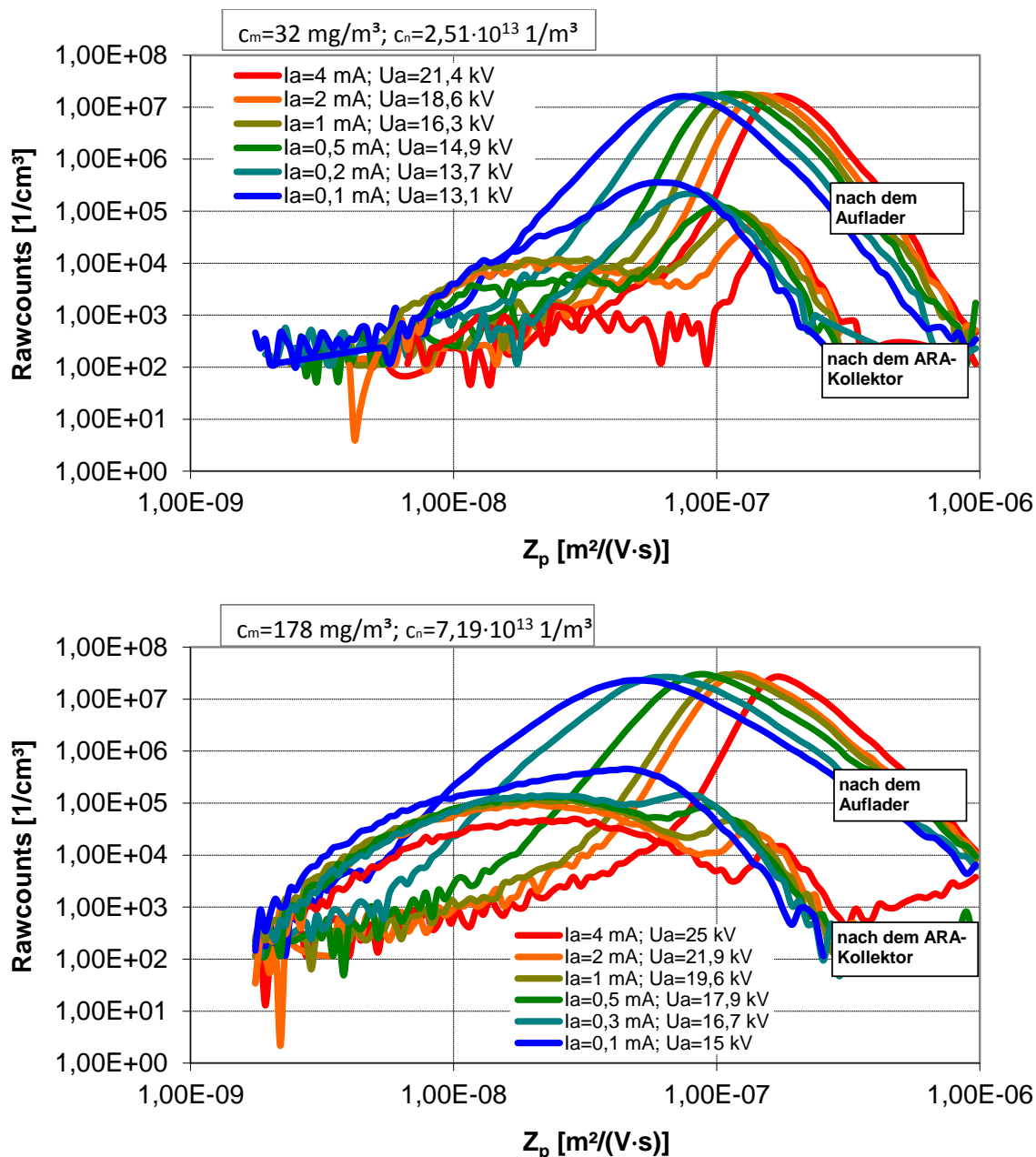


Abbildung 6-26 Mobilitätsverteilungen bei unterschiedlichen Rohgaskonzentrationen. PFE-Spannung 25 kV; Volumenstrom 1000 m³/h

6.2.3 Untersuchungen zu den Entladungsvorgängen im ARA-Kollektor

Um die Ursache für das Entstehen von Teilchen mit geringer elektrischer Mobilität in der Kollektorstufe zu finden, werden die in diesem Kapitel dargestellten Experimente durchgeführt.

Der Versuch wird nach dem in der Abbildung 6-27 dargestellten Messschema durchgeführt. Ein neutrales Aerosol wird in das Plattenpaket geleitet, an dem die Spannung anliegt. Erwartet wird, dass bereits unterhalb der Betriebsspannung zufällige Entladungen, die durch die Verschmutzungen begünstigt werden, zwischen den Elektroden auftreten und, wenn diese von der Niederschlagselektrode ausgehen, Teilchen umladen.

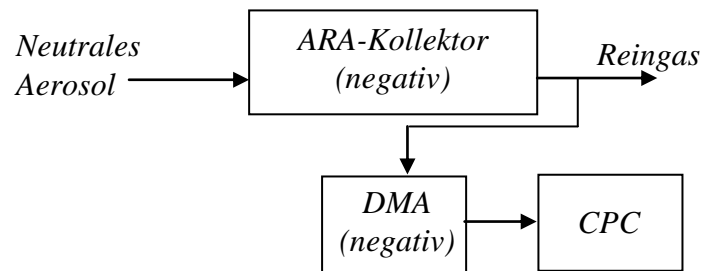


Abbildung 6-27 Messschema zur Beobachtung der Teilchenaufladung im Plattenpaket

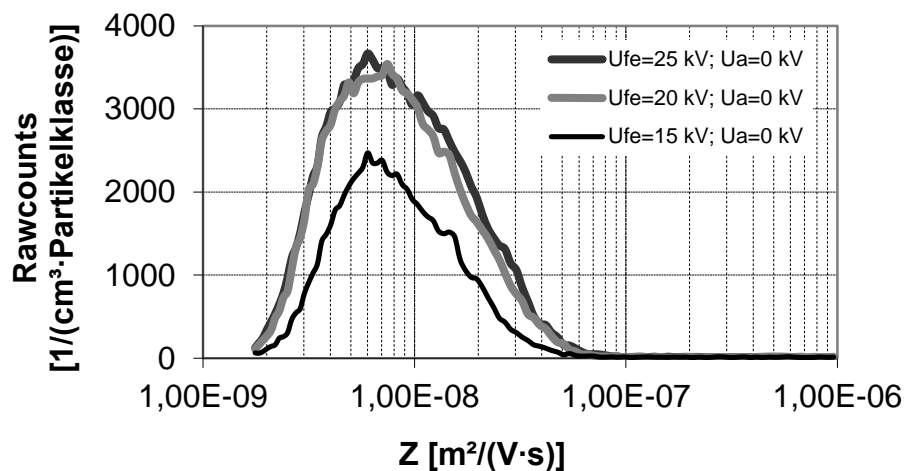


Abbildung 6-28 Mobilitätsverteilung von Teilchen der zur PFE entgegengesetzten Polarität am Austritt aus dem Plattenpaket. Plattenabstand 5 cm

Bereits bei einer mittleren Feldstärke von 3 kV/cm ($U_{PFE}=15 \text{ kV}$) wird eine Teilchenaufladung an der Niederschlagselektrode beobachtet. Wird die Feldstärke erhöht (bis $4\text{-}5 \text{ kV/cm}$, $U_{PFE}=20\text{-}25 \text{ kV}$), so steigt die Anzahl von geladenen Teilchen. Der geringe Unterschied zwischen den Messungen bei 4 und 5 kV/cm wird durch die mit der Erhöhung von der Feldstärke steigende Teilchenabscheidung verursacht.

Die Anzahl von gemessenen geladenen Teilchen ist insgesamt sehr gering und liegt in diesem Fall bei $0,14\text{-}0,24\%$ der Partikelgesamtkonzentration. Dies zeigt, dass der Kollektor bei Vorliegen eines neutralen Aerosols nur wenig zur Teilchenentladung bzw. -Umladung beiträgt.

Mit geladenen Aerosolen ändern sich aber die Feldstärken auch im Kollektor durch den Beitrag der Raumladung, und die Aerosolentladung kann zunehmen. Um das zu bestätigen, wird eine Reihe von Experimenten nach dem in der Abbildung 6-29 dargestellten Schema durchgeführt. Ein negativ geladenes Aerosol wird in den geerdeten ARA-Kollektor geleitet und die Mobilitätsverteilung positiver Teilchen wird am Austritt aus dem Kollektor ermittelt.

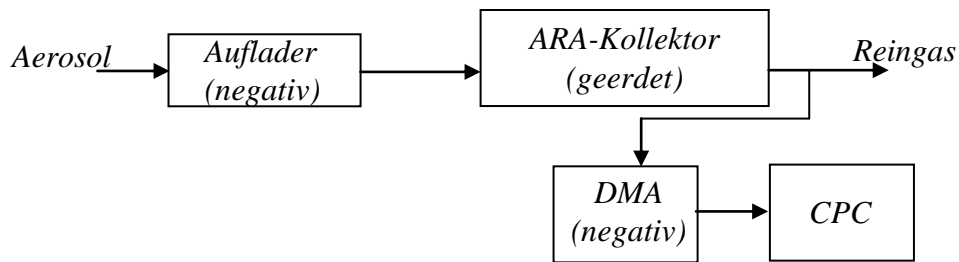


Abbildung 6-29 Messschema zur Untersuchung der Aerosolselfentladung in der ARA-Stufe

Die Ergebnisse der Messung sind in der Abbildung 6-30 dargestellt. Eine große Anzahl von umgeladenen Partikeln wurde gemessen (ca. 4% der Partikelgesamtkonzentration).

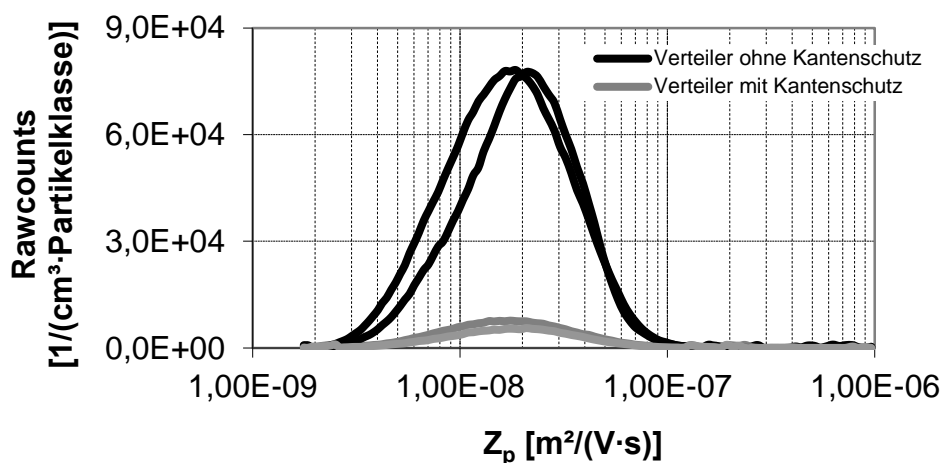


Abbildung 6-30 Mobilitätsverteilung positiver Teilchen am Austritt aus dem geerdeten Plattenpaket bei negativer Aufladung. Teilchenraumladungsdichte $50 \mu\text{C}/\text{m}^3$

Die positiven Teilchen entstehen eventuell in der Kollektorelektrode, die einen großen Querschnitt hat. Die eingebauten Strömungsverteiler haben relativ scharfe Kanten, an denen die Aerosol-Selbstentladung entstehen kann. Um diesen eventuellen Entladungsvorgang zu hindern, wird an die Blechkanten des Verteilers ein aus isolierendem Kunststoff bestehender Kantenschutz angebracht. Danach ist eine starke Reduzierung der Selbstentladung zu sehen (Abbildung 6-30). Im weiteren Versuchsverlauf wird die Selbstentladung durch einen verbesserten Kantenschutz bis zu einer Betriebsspannung von 30 kV vollständig unterdrückt.

6.2.4 Ermittlung der Trennkurven

Die Untersuchungen zur Partikelabscheidung erfolgten nach dem in der Abbildung 6-31 dargestellten Schema. Die Partikelgrößenverteilungen wurden am Austritt aus der ARA-Anlage gemessen. Die Rohgasmessung wurde bei $U_a = 0 \text{ kV}$ und $U_{PFE} = 0 \text{ kV}$ durchgeführt. Die Betriebsspannung der PFE wurde mittels Entladestrecke auf 26 kV eingestellt.

Die Trennkurven für verschiedene Auflader-Betriebsparameter und die Partikelgrößenverteilungen im Rohgas sind in der Abbildung 6-32 dargestellt. Die Messungen haben hohe Abscheidegrade gezeigt, die im gesamten Partikelgrößenbereich über 99,5% liegen. Kein Einfluss der Aufladerpolarität wurde festgestellt.

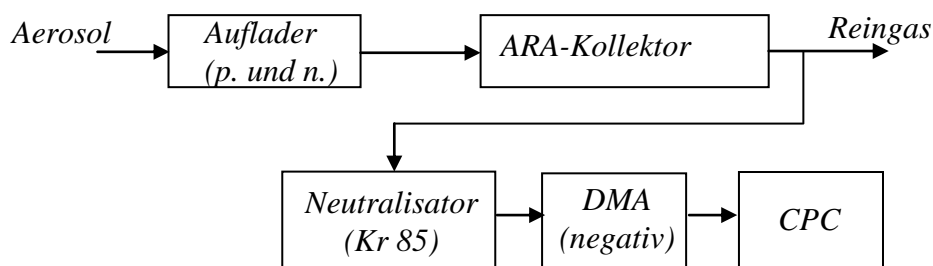


Abbildung 6-31 Messschema der Partikelgrößenverteilungen im Roh- und Reingas

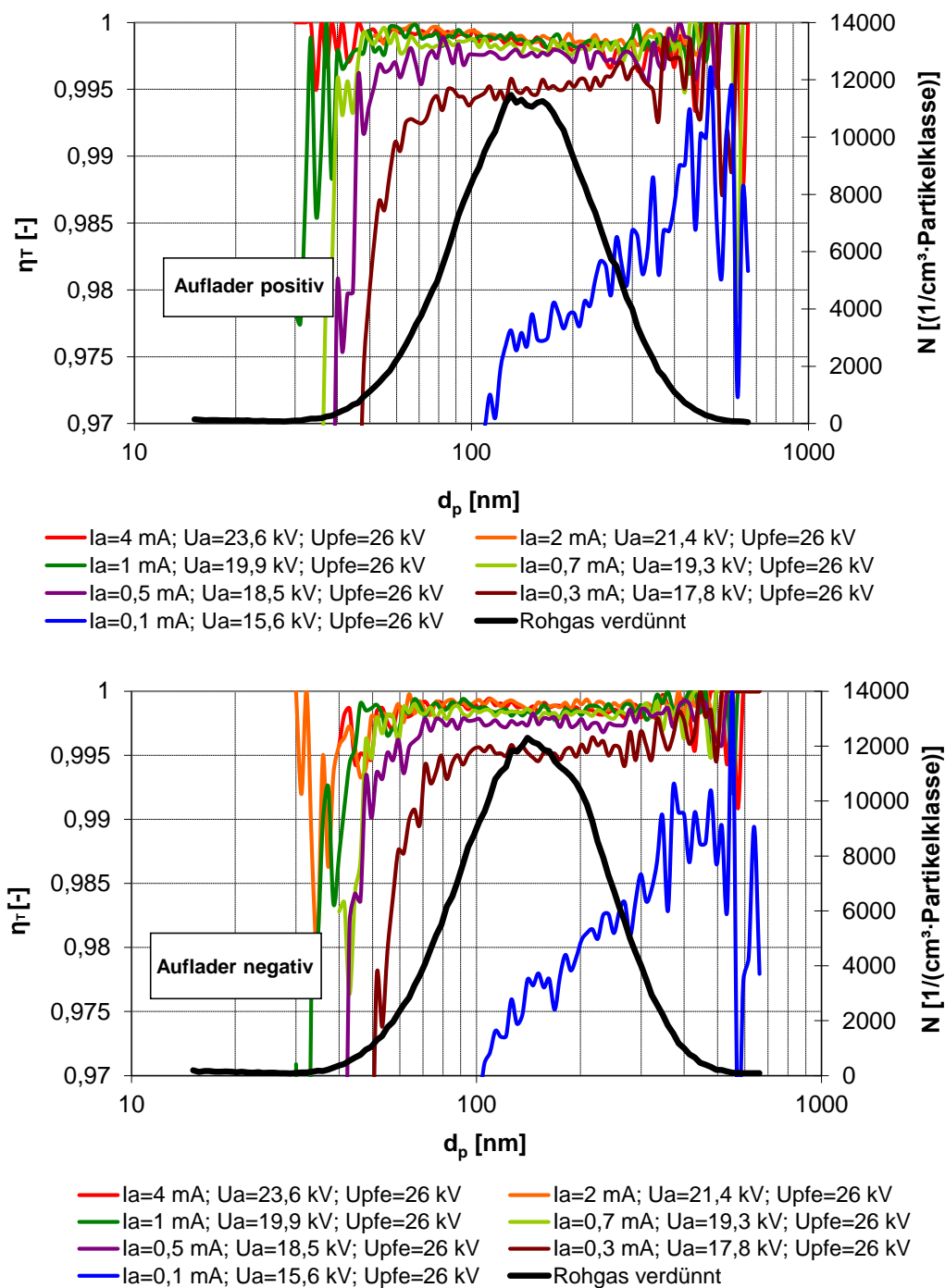


Abbildung 6-32 Trennkurven. Gemessen bei verschiedenen Auflader-Polaritäten. Volumenstrom 1000 m³/h, Massenkonzentration 178 mg/m³, Anzahlkonzentration $7,19 \cdot 10^{13}$ 1/m³

Der massenbezogene Gesamtabscheidegrad und die Partikelemission im Reingas sind in der Abbildung 6-33 als Funktion des volumenbezogenen Energieverbrauches dargestellt. Die Partikelemission nimmt mit der Erhöhung des Energiebedarfs exponentiell ab. Ein sehr hoher Abscheidegrad von über 99,5% wurde bereits bei einem Energieverbrauch von 20 J/m³ (0,3 mA; 17,8 kV) erzielt. Die weitere Erhöhung des Energieeintrages bringt keine Verbesserung der Abscheideleistung. Die Ursache dafür sind Entladungen im Plattenpaket der 2.Stufe.

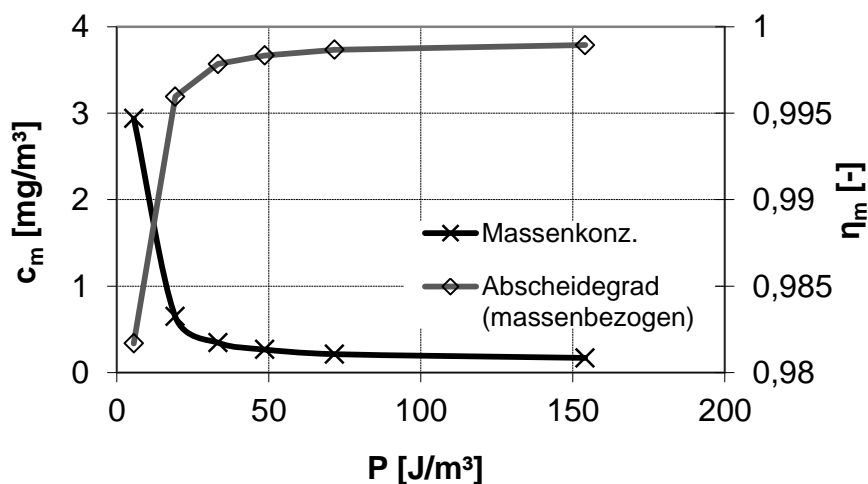


Abbildung 6-33 Massenkonzentration im Reingas und massenbezogener Abscheidegrad als Funktion des spezifischen Energieverbrauchs. Massenkonzentration im Rohgas 178 mg/m³, Anzahlkonzentration im Rohgas $7,19 \cdot 10^{13}$ 1/m³

6.2.5 Untersuchungen zum Überschlag im Plattenpaket bei einem unkontrollierten Feldaufbau

Der Verlauf des elektrischen Potentials der potentialfreien Elektrode bei der aus der Schaltung herausgenommenen Entladungs-Kaskade ist der Abbildung 6-34 dargestellt. Bei positiver Polarität der PFE führte die unkontrollierte Aufladung, wie erwartet, zu einem Überschlag (bei etwa 34 kV). Bei negativer Aufladerpolarität stieg die Spannung dagegen nur bis 26 kV und verlief schwankend weiter, ohne die Durchbruchsspannung zu erreichen.

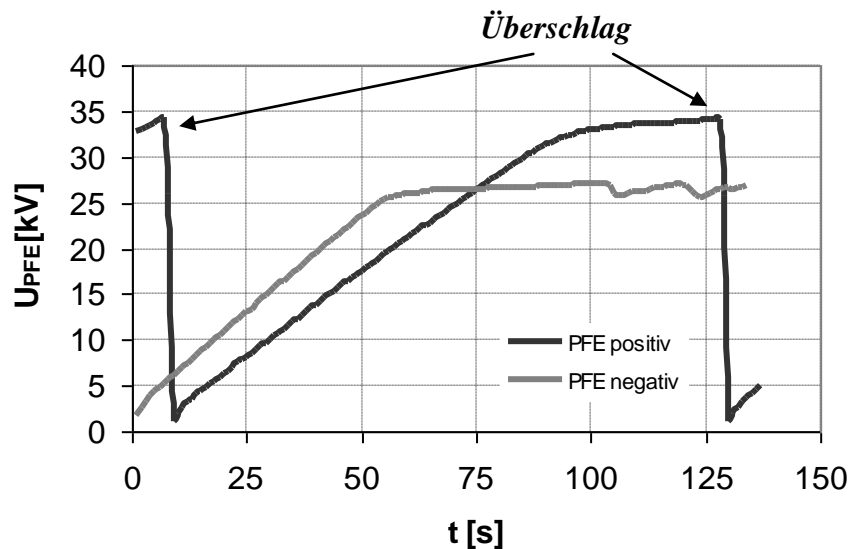


Abbildung 6-34 Verlauf der Betriebsspannung der PFE bei unterschiedlichen Aufladepolaritäten. Bei der negativen Polarität (graue Linie) wurde keine Überschlagsspannung erreicht

Die anschließende Messung von Strom-Spannungskennlinien des Plattenpakets (Abbildung 6-35) zeigt einen deutlich höheren Stromfluss bei negativer Aufladerpolarität. Die visuelle Beobachtung hat gezeigt, dass die Entladung an den Abtropfstellen in der Form eines Elektrosprays stattfindet. Bei der negativen Elektrospraypolarität setzt die Entladung bei viel niedrigeren Feldstärken ein.

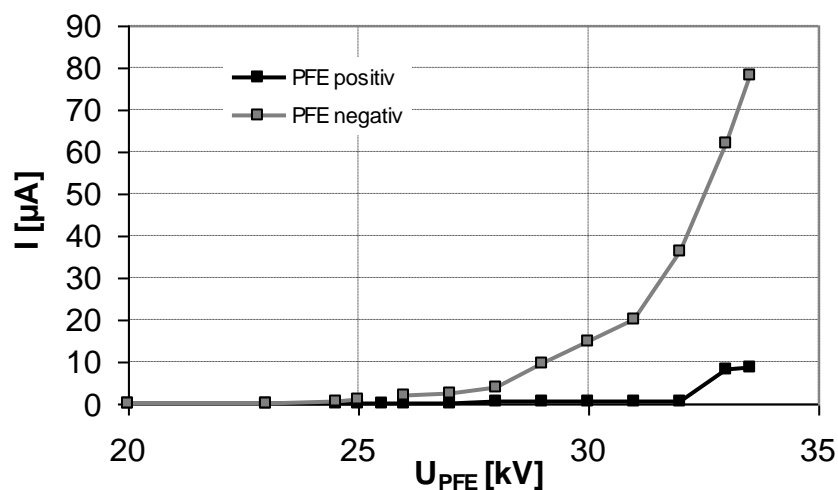


Abbildung 6-35 I-U-Kennlinien der potentialfreien Elektrode

Beim manuellen Anlegen von der Spannung wurde der Überschlag bei ca. 34 kV erzeugt, unabhängig von Spannungspolarität. Die Beobachtung hat gezeigt, dass der Überschlag, wie erwartet, an den Stellen mit der engsten Gassenbreite auftritt. Aufgrund von nicht genau definierten Plattenabständen, die z.T. knapp über 3 cm waren, kann die erreichte Überschlagsfeldstärke als ca. 10 kV/cm eingeschätzt werden.

6.2.6 Potentialverlauf der PFE nach dem Abschalten des Aufladers

Zur Beurteilung der Isolationsqualität wird ein Versuch zur Beobachtung des Potentialverlaufes der PFE bei einem evtl. Konzentrationsabfall und dem anschließenden Zusammenbruch der Aufladung der PFE durchgeführt. Während des Anlagenstillstandes wird die PFE manuell auf Spannung gelegt und das PFE-Potential wird gemessen, siehe Abbildung 6-36.

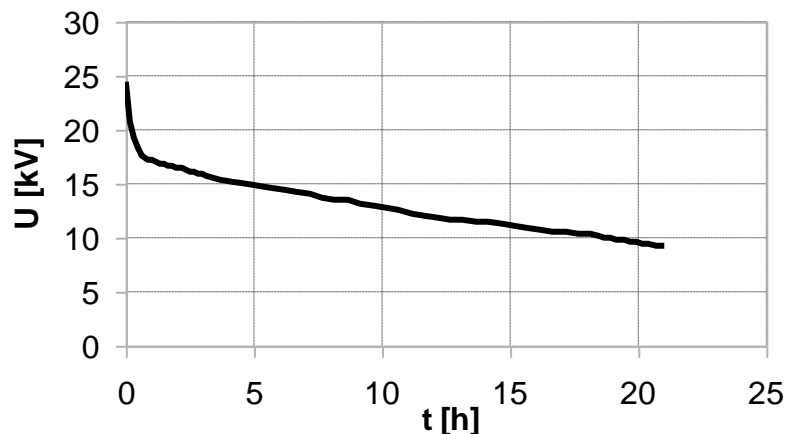


Abbildung 6-36 Entladung der PFE nach dem Betriebsabbruch

Der steile Abfall von Spannung während der ersten Stunde nach dem Abbruch des Betriebs weist auf die Entladungsströme zwischen der PFE und NE hin. Diese Entladungen sind sehr schwach und entstehen überwiegend auf den verunreinigten Elektrodenoberflächen und an den Abtropfstellen. Im Weiteren ist ein flacherer (vermutlich exponentieller) Abfall zu beobachten, der hauptsächlich durch Kriechströme auf den Isolatoroberflächen verursacht wird.

Aus dem Verlauf ist zu sehen, dass einige Stunden nach dem Betriebsabbruch hohe elektrische Potentiale auf der PFE vorhanden sind. Dies stellt in der Verbindung mit großer elektrischer Kapazität der Elektrode für das technische Personal ein Sicherheitsrisiko dar, das später beim Entwurf der Industrieanlage behoben werden muss.

6.2.7 Messung der Ozonkonzentration

Die Ozonmessung erfolgt mit einem Gerät der Fa. Dräger, Modell „Polytron-2“, ausgestattet mit einem O_3 -Sensor bei einem Volumenstrom von 1000 m³/h ohne Aerosol. Die Messung wird am Austritt aus dem Auflader durchgeführt. Die Ergebnisse der Messung sind in der Abbildung 6-37 dargestellt.

Der MAK-Grenzwert von 0,1 ppm wird bei negativer Aufladerpolarität bereits bei einem Strom von 1,8 mA überschritten. Bei positiver Aufladerpolarität liegen Ozonwerte im gesamten Bereich unterhalb vom MAK-Grenzwert.

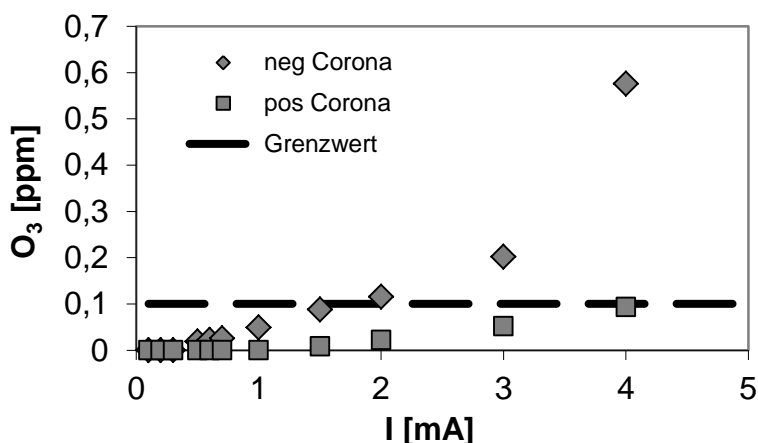


Abbildung 6-37 Ozonkonzentration bei positiver und negativer Aufladerpolarität. Gemessen hinter dem Auflader ohne Aerosol, bei 1000 m³/h. Drahtradius 0,25 mm, Abstand Draht-Wand 5 cm; Drahtlänge 6,4 m

6.3 Zusammenfassende Bewertung der Messergebnisse

Das ARA-Prinzip wurde auf der Basis einer großen Laboranlage mit Durchsatz bis 1000 m³/h realisiert und mit Aerosolen hoher Konzentrationen von bis zu $7,2 \cdot 10^{13}$ 1/m³ getestet. Hohe Gesamtabseidegrade von über 99,5% wurden bereits bei einem sehr geringen spezifischen Energieverbrauch von 20 J/m³ erzielt. Mittels stromgesteuerter Aufladerregelung wurde der Betrieb bei schwankenden Aerosolkonzentrationen realisiert und Vorteile wie eine niedrige Ozonproduktion und energieeffiziente Abscheidung wurden geliefert. Auch bei sehr kleinen Rohgaskonzentrationen (bis 3,8 mg/m³) wurde die Aufladung der PFE gewährleistet.

Für die Berechnung des Aerosolzustandes am Austritt aus dem Auflader hat sich das Modell von Lübbert für den gequenchten Elektroabscheider als sehr gut erwiesen. Für den rechteckigen Auflader-Querschnitt wurde unter Verwendung des Äquivalentradius eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Partikelkonzentrationen und mittlerer Teilchenladung erzielt, auch bei sehr geringen Aerosolkonzentrationen (im Übergangsbereich). Anhand dieser Parameter ließ sich die Aufladezeit der PFE recht gut abschätzen.

Die Ermittlung von Verteilungen der elektrischen Teilchenbeweglichkeit vor und nach dem Kollektor liefert ein ausführliches Bild zu den Vorgängen in der Anlage und lässt Probleme wie Aerosol-Selbstentladung und Elektrodenverschmutzung erkennen.

Mit positiver Aufladerpolarität wurden höhere Feldstärken im Kollektor erzielt. Durch den Einsatz der Corona-Kaskade wurde eine kontrollierte Aufladung der PFE realisiert. Durch den Einsatz von gespülten Glasisolatoren wurde eine gute Isolierung der PFE gewährleistet. Hohe elektrische Potentiale wurden noch mehrere Stunden nach dem Abschalten des Aufladers an der PFE gemessen.

Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass das ARA-Prinzip sich sehr gut für den beabsichtigten Einsatzbereich – Abscheidung von hochkonzentrierten flüssigen Aerosolen – eignet. Der Energiebedarf der Abscheidung ist dabei um Größenordnungen niedriger als bei konventionellen Elektroabscheidern.

7 Weitere Untersuchungen zur Aerosolselfstentladung

Im Kapitel 6 wurde bereits die Problematik der Aerosolselfstentladung aufgezeigt und auch während der Untersuchungen an der ARA-Laboranlage experimentell beobachtet. Zur vertieften Untersuchung der Aerosolselfstentladung und ihrer Wirkung auf den Abscheideprozess wird eine zusätzliche Reihe von Experimenten durchgeführt. Ein hoch geladenes Aerosol wird in einen großräumigen Behälter geleitet. Die Selbstentladung wird an verschiedenen Orten des Behälters durch das Einsetzen einer geerdeten Nadelelektrode hervorgerufen. Der Einfluss der Selbstentladung auf den Verlauf der Raumladungsdichte im Behälter und die Entladungsform an der Spitze werden dabei beobachtet.

Hintergrund

Wenn ein geladenes Aerosol sich in einem Volumen befindet, z.B. durch eine rohrförmige Leitung strömt, ist die vom Aerosol erzeugte Feldstärke proportional zum Radius der Leitung (Gl. 2-70). Bei großen Radien können an den Wänden der Leitung Feldstärken erreicht werden, die für eine Gasionisation ausreichen. So beobachtete Higashiyama in seinen Untersuchungen [Hig01, Hig07] die Entladungen, die durch das Einführen geerdeter Elektroden in eine Wolke von geladenen Teilchen hervorgerufen wurden. Boschung et al. versuchten eine blitzartige Entladung in einem mit geladenem Staub gefüllten 60 m³-großen Behälter zu erzeugen, der Versuch scheiterte aber wegen der relativ niedrigen Raumladungsdichten im Behälter (ca. 2,66 µC/m³) und wegen der während des Experiments auftretenden Selbstentladung [Bos77]. Weitere Informationen zur Bildung ähnlicher blitzartiger Entladungen in der Natur sind in [Har11, Ale08] zu finden.

Solche Gasentladungen führen zum Abbau der Netto-Raumladung durch Umladung und Entladung von geladenen Teilchen. In der Folge führt das bei zweistufigen Elektroabscheidern zur Durchströmung der Kollektor-Stufe durch diese Teilchen. Die Verluste von Raumladung würden in der ARA-Anlage auch zur Verlangsamung der Aufladung der PFE führen. In einem konventionellen Raumladungsabscheider hätte der starke Verlust von Raumladungsdichte den Zusammenbruch der Partikelgesamtabseidung zur Folge, da mit dem Abbau der Netto-Raumladung auch die für die Partikelabscheidung notwendige Feldstärke stark abfällt.

Die Selbstentladung des Aerosols wird durch die Anwesenheit von Verschmutzungen und scharfen Elektroden-Geometrien (z.B. Kanten und Ecken) begünstigt. Das soll bei der Auslegung der Verbindungsleitung zwischen der 1.Stufe und 2.Stufe berücksichtigt werden. Wenn die Leitungsgeometrie vorgegeben ist (z.B. bei der Nachrüstung einer bestehenden Anlage mit ARA-Stufe), führt die dadurch begrenzte Raumladungsdichte zur Limitierung der maximalen mittleren Teilchenladung am Austritt aus dem Auflader:

$$\bar{n}_{\max} = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{\text{Überschlag}}}{e \cdot r_L \cdot c}, \quad 7-1$$

mit Konzentration c [1/m³], Leitungsradius r_L [m] und $E_{\text{Überschlag}}$ - limitierender Feldstärke an der Leitungs-Wand [V/m]. Wegen der damit verbundenen Verringerung der elektrischen Mobilität der Teilchen würden größere Verweilzeiten in der nachfolgenden Kollektorstufe benötigt.

Die Selbstentladung kann vermieden werden, indem große freie Querschnitte mit einer leitfähigen Schüttung gefüllt werden oder Leitungsausweitungen vermieden werden.

7.1 Versuchsaufbau zur Untersuchung der Aerosolselfentladung

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Aerosolgenerator (analog zum Kapitel 6), einem Auflader und einem zylindrischen Behälter, siehe Abbildung 7-1.

Der Behälter besteht aus sechs Segmenten, die jeweils eine Höhe von 235 mm und einen Durchmesser von 600 mm haben. Das Gesamtvolumen des Behälters ist 396 l. Bei einem Volumenstrom von 500 m³/h ergibt sich eine Verweilzeit von 2,85 s. Das Aerosol strömt seitlich in das untere Segment ein. Die einzelnen Behältersegmente sind voneinander elektrisch isoliert, der elektrische Strom wird separat über einen 100 k Ω -Messwiderstand von einzelnen Segmenten erfasst. Die Probenahme-Stellen werden an die Rohrleitung am Eintritt in den Behälter, an die Behälter-Segmente und an die Rohrleitung am Austritt aus dem Behälter angebracht und mit P1 bis P6 entsprechend der Abbildung markiert.

Für die Aerosolmessung werden das SMPS und der Kreislaufverdünner (analog zu den Kapiteln 6.1.4 und 6.1.3) eingesetzt. Die Raumladungsdichte wird mit dem radioaktiven Faraday-Cup- Elektrometer erfasst.

Das Aerosol wird im Auflader ($r_R=150$ mm; $r_D=0,25$ mm; $L=2,3$ m; $U_E=11,85$ kV), der eine Verweilzeit von 0,28 s hat, und mit Spannungen von bis 35 kV betrieben wird, aufgeladen. Die den Betriebsspannungen entsprechende Partikelgesamtkonzentrationen am Austritt aus dem Auflader, die Raumladungsdichten und die daraus berechneten mittleren Teilchenladungen werden in der und Tabelle 2 dargestellt. Die Gesamtkonzentration wurde anhand der Gleichung 6-5 korrigiert. Die Partikelgrößenverteilungen sind in der Abbildung 7-2 gezeigt.

U_{Auflader} [kV]	ρ_p [$\mu\text{C}/\text{m}^3$]	c_{ges} [$1/\text{m}^3$]	n_{mittel} [-]
0	0	$1,74 \cdot 10^{14}$	0
20	52,7	$1,59 \cdot 10^{14}$	2,1
25	77,5	$1,42 \cdot 10^{14}$	3,4
30	92,4	$1,10 \cdot 10^{14}$	5,2
35	105,1	$7,96 \cdot 10^{13}$	8,2

Tabelle 2 Raumladungsdichte, Partikelgesamtkonzentration und mittlere Teilchenladung bei verschiedenen Aufladerspannungen. Gemessen bei P1

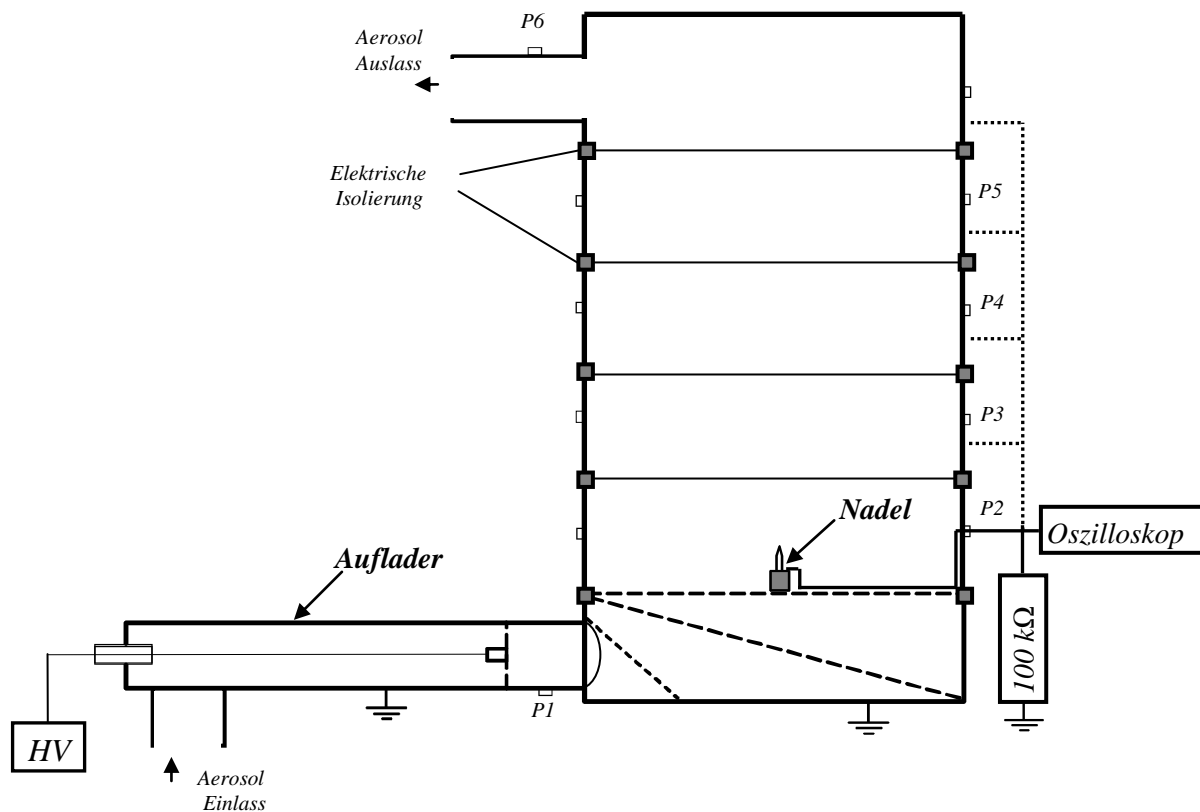


Abbildung 7-1 Versuchsaufbau zur Beobachtung der Aerosolselfentladung

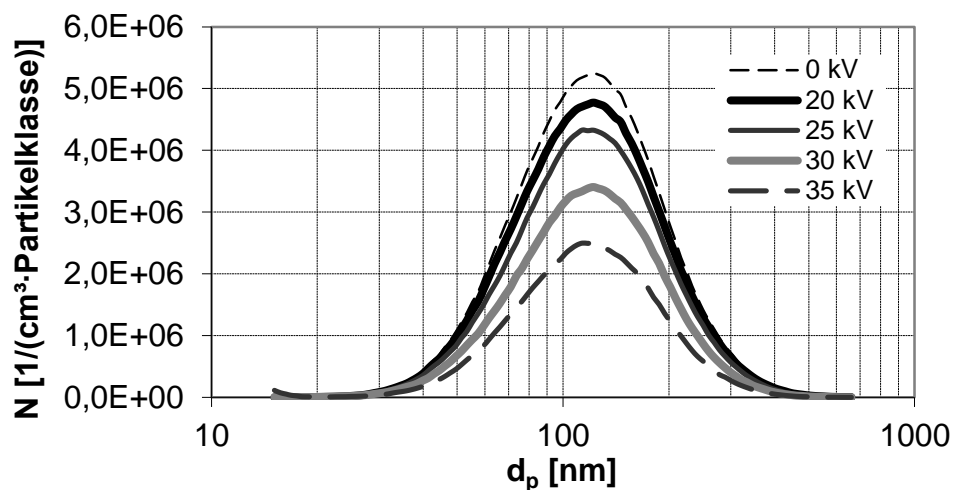


Abbildung 7-2 Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Aufladerspannungen. Gemessen bei P6

7.2 Nachweis von Selbstentladung

Der Nachweis von Selbstentladung erfolgt nach dem in der Abbildung 7-3 dargestellten Schema. Die Partikeln mit der zum Auflader entgegengesetzten Polarität werden un-neutralisiert mit einem DMA erfasst.

Die Messungen haben gezeigt, dass bereits bei -20 kV Aufladerspannung und Raumladungsdichte von $52,7 \mu\text{C}/\text{m}^3$ positive Teilchen vorliegen, siehe Abbildung 7-4. Mit steigender

Spannung reduziert sich wegen der verstärkten bipolaren Agglomeration die Anzahl von positiven Teilchen.

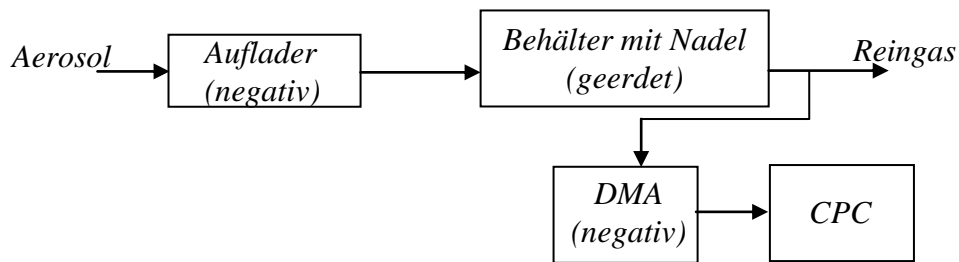


Abbildung 7-3 Messschema zum Nachweis von Selbstentladung

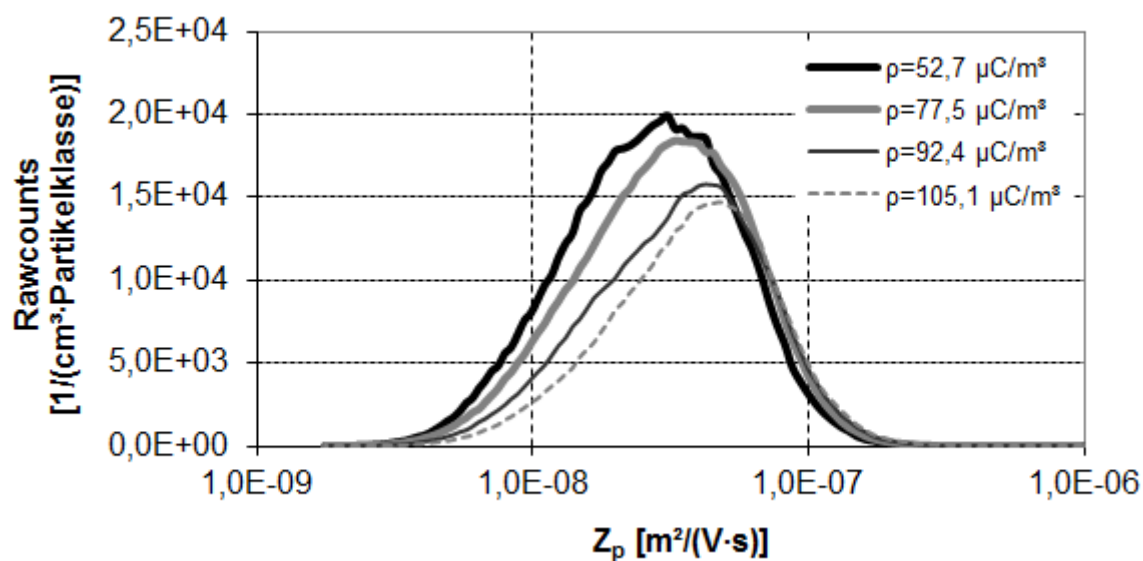


Abbildung 7-4 Mobilitätsverteilung positiver Teilchen bei negativer Aufladung. Messstelle P6. Volumenstrom $500 m^3/h$

7.3 Einfluss auf die elektrostatische Dispersion

Zur Beobachtung des Einflusses von Selbstentladung auf die Raumladungsabscheidung im Behälter wurden die elektrischen Ströme von den einzelnen Behälterwandsegmenten gemessen. Die gemessenen Werte (nummeriert entsprechend den Messstellen P2-P5) mit und ohne Selbstentladung sind in der Abbildung 7-5 dargestellt. Eine deutliche Reduzierung der durch Raumladungsabscheidung bedingten elektrischen Ströme wird im Fall des Auftretens von Selbstentladung beobachtet. Die Nadelposition ist in der Mitte des 2.Segments.

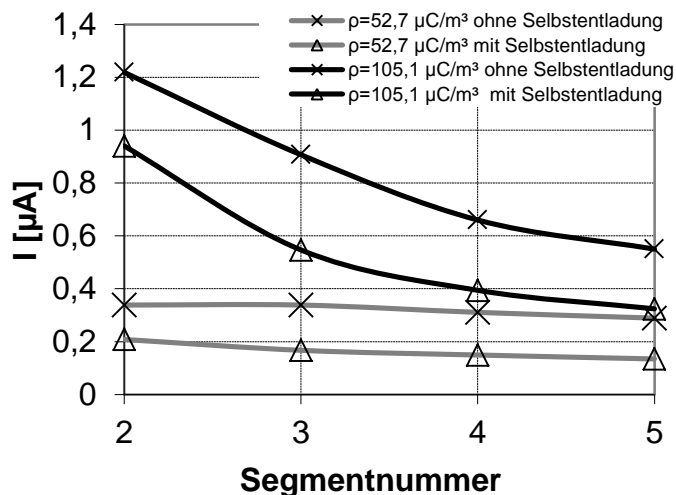


Abbildung 7-5 Elektrische Ströme von einzelnen Behältersegmenten, verursacht durch elektrostatische Dispersion. Spitze in der Behältermitte

7.4 Elektrohydrodynamische Strömung durch Selbstentladung

Da die genaue Messung der Raumladungsdichte im Inneren des Behälters nicht möglich ist (eine durch die glatte Behälterwand eingeführte Sonde würde wie eine Spitze wirken und kann die Selbstentladung und verstärkte Teilchenabscheidung hervorrufen), wird die Raumladungsdichte zuerst nur an der Behälterwand gemessen, siehe Abbildung 7-6.

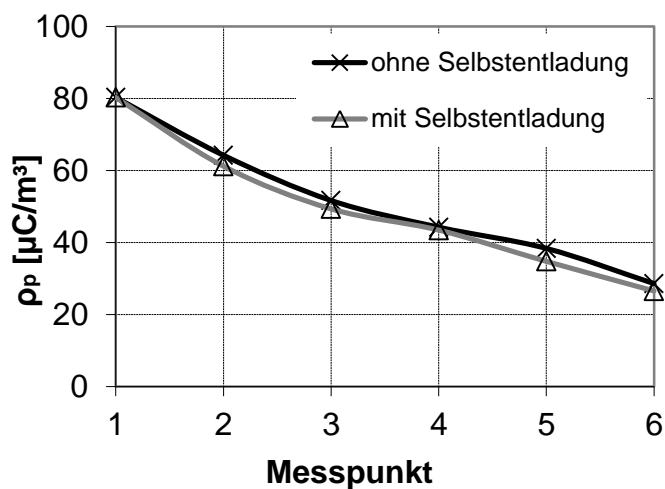


Abbildung 7-6 Raumladungsdichte an der Behälterwand, gemessen an den Messstellen P0-P6. Spitze in der Behältermitte

Das Ergebnis zeigt einen unerwartet ähnlichen Verlauf von gemessenen Raumladungsdichten in den Fällen mit und ohne Selbstentladung, was dem gemessenen Einfluss auf die elektrostatische Dispersion widerspricht. Um diese Unstimmigkeit genauer zu untersuchen, wird eine Messung der Raumladungsdichte an der Probenamestelle P6 durchgeführt. Der kleine Rohrquerschnitt ($r=7,5$ cm) erlaubt an dieser Stelle das Einführen der Messsonde in das Rohr, ohne das Ergebnis dabei zu verfälschen. Die gemessenen Raumladungsdichten über den Rohrradius sind in der Abbildung 7-7 dargestellt. Das Ergebnis zeigt eine homogene

Raumladungsverteilung im Rohr bei dem Versuch ohne Nadelelektrode (keine Selbstentladung). Mit der in der Behältermitte installierten Nadelelektrode wird eine deutliche Reduzierung der Raumladung in der Rohrmitte festgestellt. Bei der Selbstentladung wird offenbar die Raumladungsdichte nahe der Nadel reduziert. Das führt dazu, dass der in der Mitte des Behälters gebildete Raum mit neutralisiertem und entladem Aerosol von einem Ringraum mit hoch geladenem Aerosol umgeben ist. Diese Verteilung ist stabil und erreicht die Probenahme-Stelle P6. Wird die Nadelelektrode an der Vorder- oder Hinterwand des Behälters installiert, so werden ähnliche, aber etwas weniger ausgeprägte Raumladungsdichte-profile bei P6 gemessen. Die Nadelposition an der Behälterwand führt zu einer exzentrischen Raumladungsverteilung und verursacht eine Vermischung des Aerosols im Behälter, siehe Abbildung 7-8.

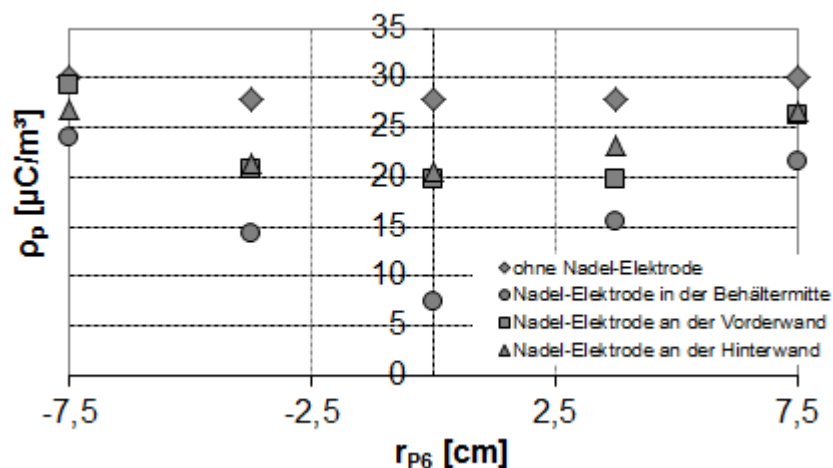


Abbildung 7-7 Verteilung der Raumladungsdichte über den Rohrquerschnitt. Gemessen an P6

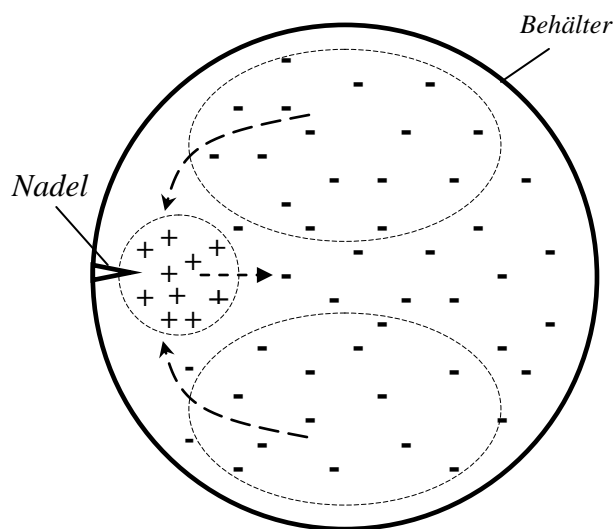


Abbildung 7-8 Entstehung der EHD-Strömung bei einer exzentrischen Raumladungsverteilung im Behälter

7.5 Entladungsverlauf

Zur Beobachtung des Entladungsverlaufs wird der Strom an der Nadel-Elektrode mit einem Oszilloskop erfasst. Der Verlauf für beide Aerosolpolaritäten ist in der Abbildung 7-9 dargestellt. Die Entladung verläuft impulsartig. Die Impulsfrequenz ist über 3 kHz. Die Strompeaks erreichen bis 60 μA . Der gleiche Verlauf wird für beide Aufladerpolaritäten beobachtet, die einzelnen Impulse sind im Vergleich in der Abbildung 7-10 dargestellt.

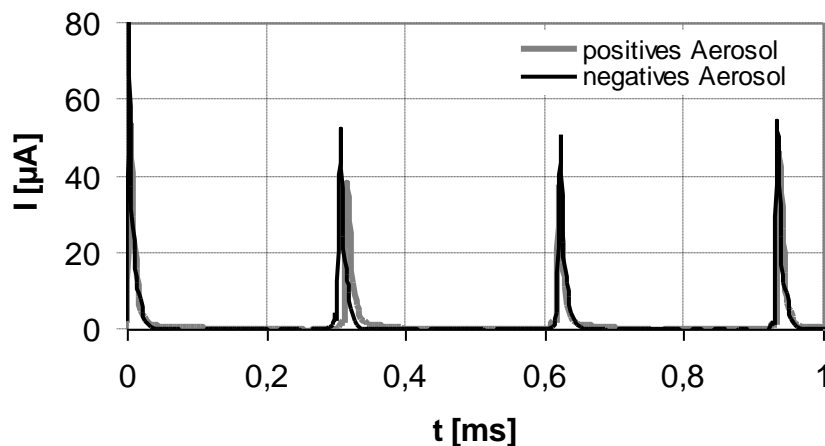


Abbildung 7-9 Zeitlicher Verlauf der Selbstentladung an der Spitze für ein positiv und negativ geladenes Aerosol. Gemessen über 100 k Ω Messwiderstand

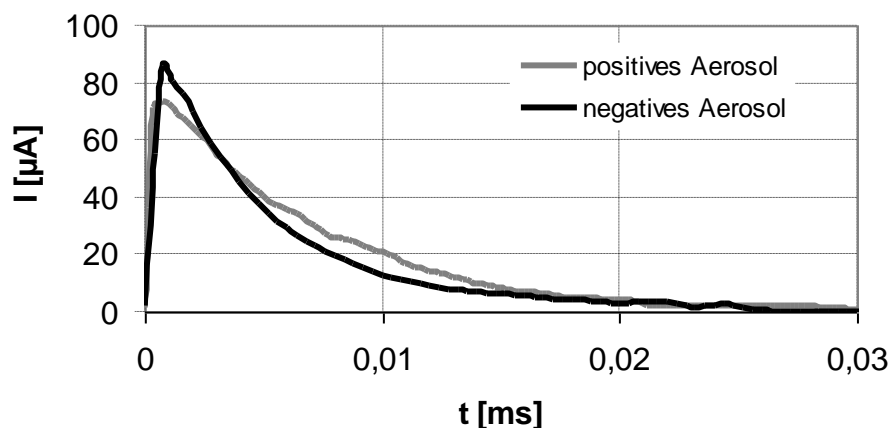


Abbildung 7-10 Vergleich der einzelnen Entladungspiks beim positiv und negativ geladenen Aerosol. Gemessen über 100 k Ω Messwiderstand

Während eines Impulses fließt die Ladungsmenge von etwa 0,5 nC. Bei einer Raumladungsdichte in der Umgebung der Nadel-Elektrode von 53 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ (ermittelt mit Gleichung 6-5) ist das während des einzelnen Impulses entladene Aerosolvolumen gleich 9,4 cm^3 . Das neutralisierte Volumen ist auf den ersten Blick sehr klein, führt aber aufgrund der hohen Entladungsfrequenz in den Gesamtabbau von Netto-Raumladung von 25 %. Die Verschiebung des Gases während der Impulsdauer von 0,3 ms beträgt nur 40 μm , aber die Entladung dringt offenbar trotzdem weit in das Aerosolvolumen ein.

Unter Annahme der Selbstentladungs-Spannung von 20 kV lässt sich eine Energie von 0,01 mJ pro Impuls abschätzen. Dieser Wert liegt im Bereich der Mindestzündenergie von extrem zündempfindlichen Stäuben (<3 mJ).

7.6 Fazit

Die Selbstentladung ist ein unerwünschter Effekt, der in vielen mehrstufigen Elektroabscheider-Aufbauten auftreten kann und einen signifikanten Verlust der Abscheideleistung verursachen kann. Insbesondere gefährdet sind Raumladungsabscheider und mehrstufige Abscheider, die bei hohen Aerosol-Konzentrationen eingesetzt werden.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Entladung impulsartig mit einer Frequenz von über 3 kHz verläuft. Der Verlauf ist polaritätsunabhängig. Der während der Selbstentladung verursachte Verlust der Netto-Raumladungsdichte führt zur drastischen Verlangsamung der elektrostatischen Dispersion.

Die während der Selbstentladung gebildeten Ungleichmäßigkeiten der Raumladungsdichte-Verteilung können zur Bildung von EHD-Strömungen führen.

8 ARA-Prototyp

Anhand der während der Laboruntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Keller-Lufttechnik GmbH ein Prototyp der ARA-Anlage entwickelt und dem LS MVT zur Erprobung bereitgestellt. Der ARA-Prototyp wird in der Abbildung 8-1 schematisch dargestellt.

Die technischen Daten des Prototyps sind im Vergleich mit denen der Laboranlage in der Tabelle 3 dargestellt. Insgesamt wurde durch die Verringerung des Elektrodenabstandes im Plattenpaket, durch die Verringerung des feldfreien Ladungskollektorbereiches und die Verringerung der Aufladergröße ein deutlich kompakterer Aufbau erzielt.

Parameter	Laboranlage	Prototyp
Auflader		
VWZ im Auflader	0,23 s	0,15 s
Anzahl der Kanäle im Auflader	4	7
Aufladerlänge	1,6 m	0,6 m
Aufladerradius	Rechteckig, $a=0,1$ m	Rechteckig, $a=0,1$ m
Drahtradius	0,25 mm	0,25 mm
ARA-Kollektor		
VWZ im Kollektor	6 s	2 s
Gesamtfläche der NE	21 m ²	21,57 m ²
Elektrodenabstand	5 cm	2 cm
Durchströmungsgeschwindigkeit	0,4 m/s	0,36 m/s
SCA	75 m ² /m ³ /s	77,65 m ² /m ³ /s
El. Kapazität der PFE	5,23 nF	10,4 nF (bei 2 mm Plattendicke)

Tabelle 3 Technische Parameter der ARA-Laboranlage und des ARA-Prototyps im Vergleich

Das Abgas gelangt durch eine Rohrleitung in den Auflader. Am Eintritt in den Auflader befindet sich als Spänevorabscheider eine Drahtgestrick-Kassette, die zur Abscheidung von groben Teilchen (wie Spänen und anderen Produktionsresten) dient und den Verunreinigungen der Elektrodenoberflächen vorbeugt. Die Kassette lässt sich leicht ausbauen und reinigen.

Der Auflader besteht aus 7 rechteckigen parallel geschalteten Kanälen ($a=10$ cm), in denen die Sprühdrahte ($r_D=0,25$ mm) gespannt werden. Die Verweilzeit im Auflader beträgt 0,151 s. Die Einströmung in die ARA-Stufe erfolgt über ein Lochblech, das die Funktion eines Strömungsverteilers hat und austauschbar ist. Die zweite Funktion des Lochbleches ist die Teilung des Leervolumens und somit das Vorbeugen von Aerosol-Selbstentladung.

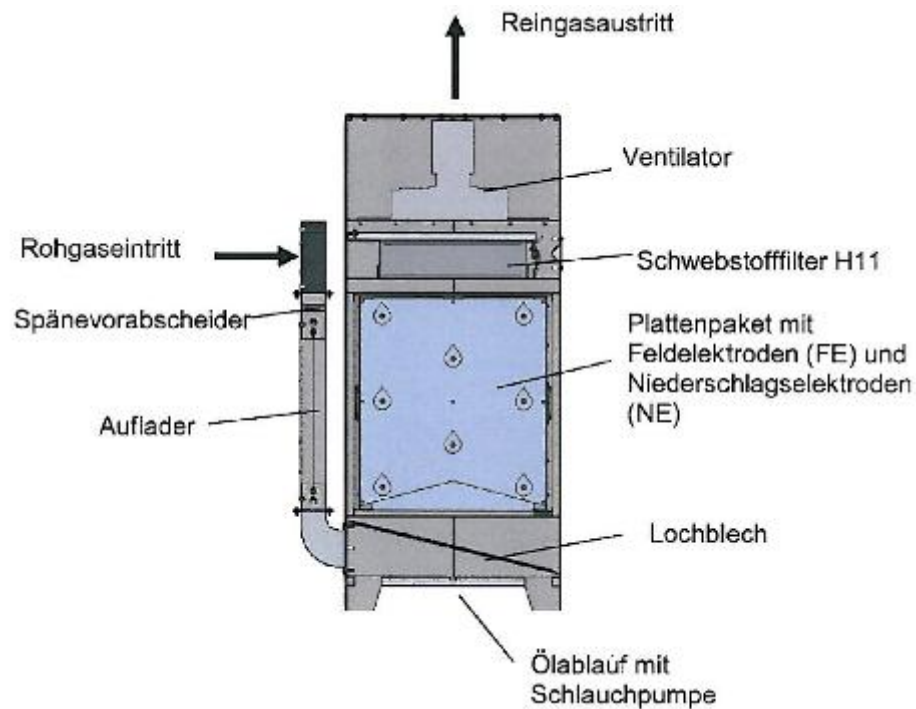


Abbildung 8-1 Prototyp ARA für 1000 m³/h. Hersteller: Fa. Keller-Lufttechnik GmbH

Die Abscheidung des geladenen Aerosols findet im Plattenpaket statt, das aus abwechselnd angeordneten potentialfreien und Niederschlagselektroden besteht (siehe Abbildung 8-2). Der Plattenabstand beträgt 20 mm. Aus Sicherheitsgründen wird das Plattenpaket mit zwei Kontakten versehen, die beim Öffnen der Tür die PFE entladen.

PFE-Entladungskontakte

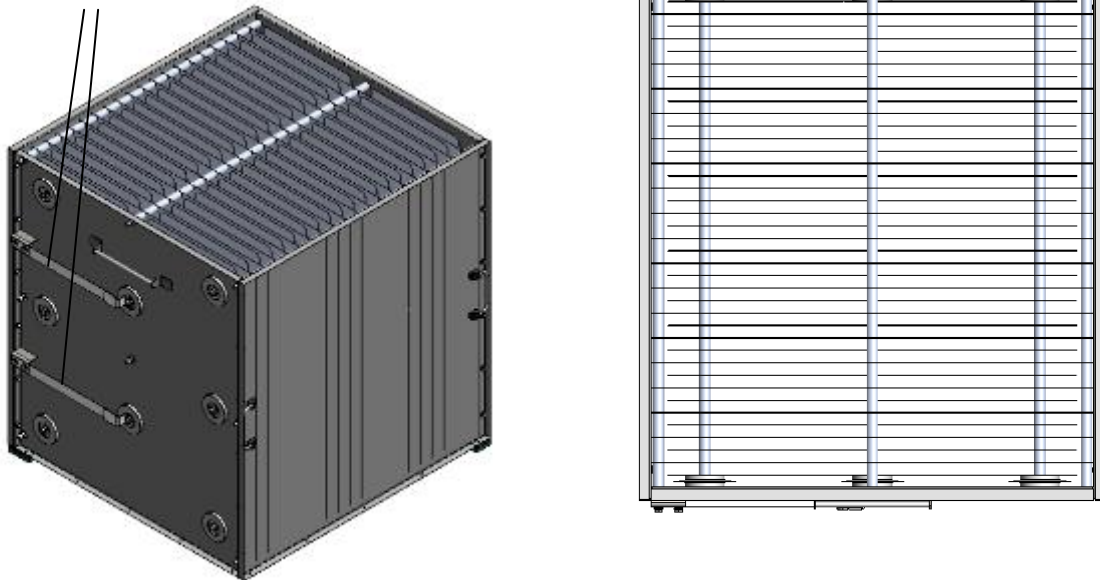


Abbildung 8-2 Aufbau des Plattenpakets

Die Niederschlagselektrode und die potentialfreie Elektrode sind einzeln in der Abbildung 8-3 dargestellt. Die Öffnungen dienen der Durchführung von Elektroden-Befestigungsstangen und haben eine Tropfen-Form, um den kontinuierlichen Abfluss des abgeschiedenen Aerosols zu

gewährleisten. Die untere Seite der Niederschlags Elektroden hat einen dreieckigen Ausschnitt, um die abgeschiedene Flüssigkeit zu den Wänden abfließen zu lassen und das Abtropfen im E-Feld zu verhindern. Gleichzeitig wird durch die Verkürzung der Niederschlags Elektrode der feldfreie Bereich gebildet, der der Aufladung der PFE dient und die Funktion der Ladungs-Kollektorelektrode hat (siehe zum Kapitel 5.3.1). Die freistehenden Ecken der PFE werden abgerundet, um hohe lokale Feldstärken zu vermeiden. Für die Anordnung der Elektroden siehe auch Anhang 12.3.

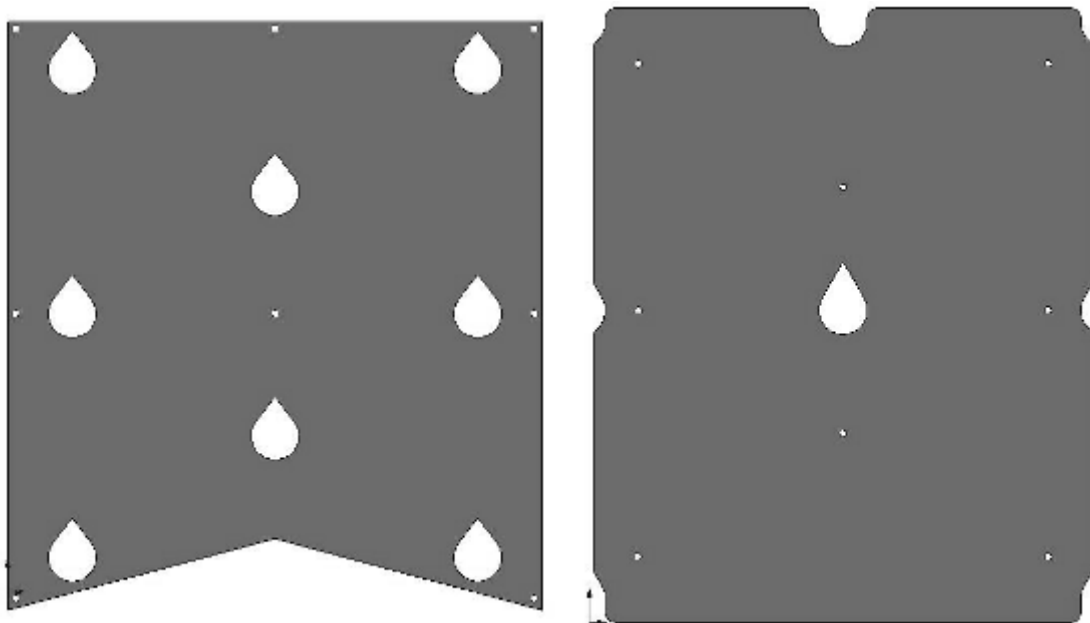


Abbildung 8-3 Elektroden-Platten im Detail. Links: Niederschlags Elektrode, rechts: potentialfreie Elektrode

Die elektrische Isolation der potentialfreien Elektrodenanordnung wird auf der Basis von Isolatoren aus Polyamid realisiert, siehe Abbildung 8-4. Ein Isolator teil (links auf dem Bild) wird durch das Außengehäuse des Plattenpakets durchgeführt und in das andere Isolator teil (rechts auf dem Bild) aufgesteckt. Durch die Öffnung in der Mitte wird die Gewindestange durchgeführt und befestigt.

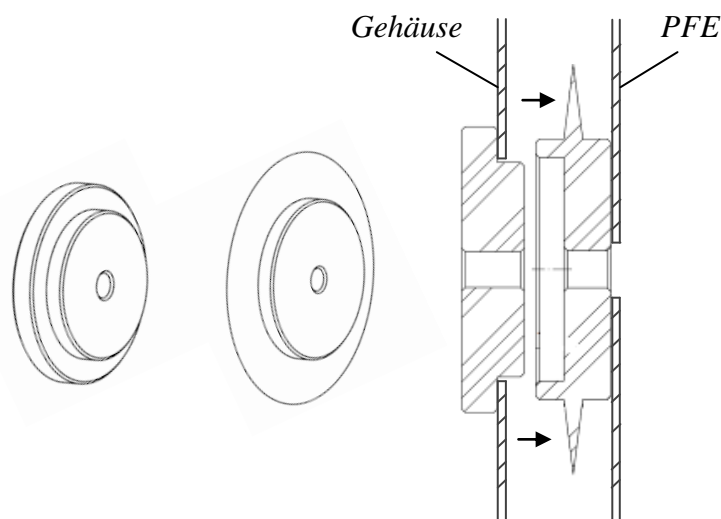


Abbildung 8-4 Polyamid-Isolatoren und ihr Montage-Schema

Am Austritt aus der Anlage wird als Sicherheitsmaßnahme ein Schwebstofffilter eingebaut, der bei einem Ausfall der Anlage die Emissionen verhindern soll. Die Spannungsversorgung wird auf der Basis eines Hochspannungsmoduls realisiert, das mit konstanter Spannung von 20 kV arbeitet. Der Abtransport des abgeschiedenen Öls erfolgt mit einer Schlauchpumpe, die am Boden der Anlage installiert wird. Das elektrische Potential der PFE wird mit einem Feldstärkemessgerät erfasst und überwacht. Der Volumenstrom bis 1500 m³/h wird mittels eines Radialventilators (1,5 kW) mit Frequenzumrichter gefördert.

8.1 Die Inbetriebnahme des ARA-Prototyps. Untersuchungen im Labor

Der ARA-Prototyp wurde im Labor in Betrieb genommen. Während der Inbetriebnahme wurden alle wichtigen Anlagenkomponenten auf die richtige Funktion überprüft und Experimente zur Bestimmung der Abscheideeffizienz wurden durchgeführt.

8.1.1 Messungen am Auflader

Die gemessenen Strom-Spannungskennlinien des Aufladers im Leerlauf werden in der Abbildung 8-5 dargestellt. Die Einsatzspannung liegt bei 11,3 kV.

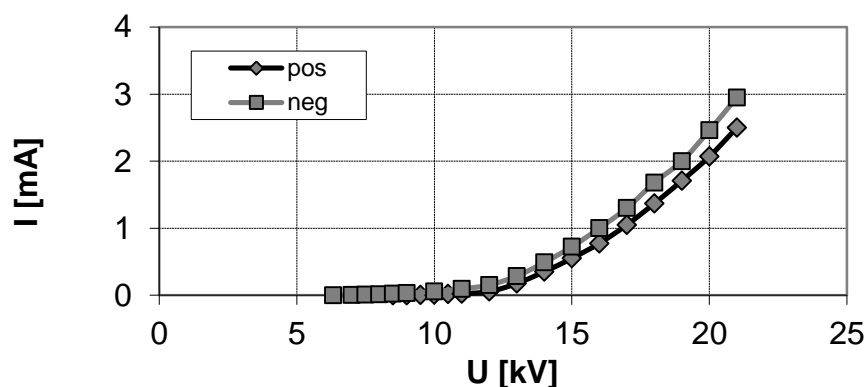


Abbildung 8-5 Strom-Spannungskennlinien des Aufladers im Leerlauf. Volumenstrom 1000 m³/h

Zur Überprüfung der Funktionsweise einzelner Auflader-Kanäle wurde die Raumladungsdichte am Austritt des jeweiligen Kanals ermittelt. Die gemessenen Werte sind nahezu gleichverteilt, siehe Abbildung 8-6.

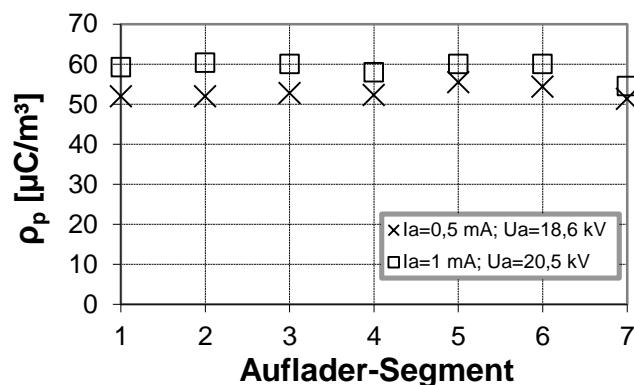


Abbildung 8-6 Raumladungsdichte am Austritt des Aufladers bei verschiedenen Betriebsparametern. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, Massenkonzentration $150 \text{ mg}/\text{m}^3$

8.1.2 Messungen am ARA-Kollektor

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden zwei Ausführungen des Elektroden-Plattenpakets mit verschiedenen Stärken der Elektroden erprobt, für die technischen Details siehe Tabelle 4.

Plattenpaket	Nr. 1	Nr. 2
Elektrodendicke	0,5 mm	2 mm
Anzahl der PFE	20	19
Anzahl der NE	19	18
Gesamtfläche von NE	$22,7 \text{ m}^2$	$21,57 \text{ m}^2$

Tabelle 4 Technische Parameter von erprobten Plattenpaketen

Die gemessenen Strom-Spannungskennlinien beider Plattenpakete sind in der Abbildung 8-7 dargestellt. Die Kennlinien wurden vor der Inbetriebnahme und nach zwei Tagen des Betriebs aufgenommen. Während des Betriebes wurde durch das abwechselnde Anlegen der Hochspannung die Abscheidung sowohl an den Niederschlagselektroden als auch an Feldelektroden erzielt. Es wird eine deutliche Minderung des elektrischen Stromes durch die Bildung eines Ölfilms auf den Elektrodenoberflächen im Laufe des Betriebs festgestellt.

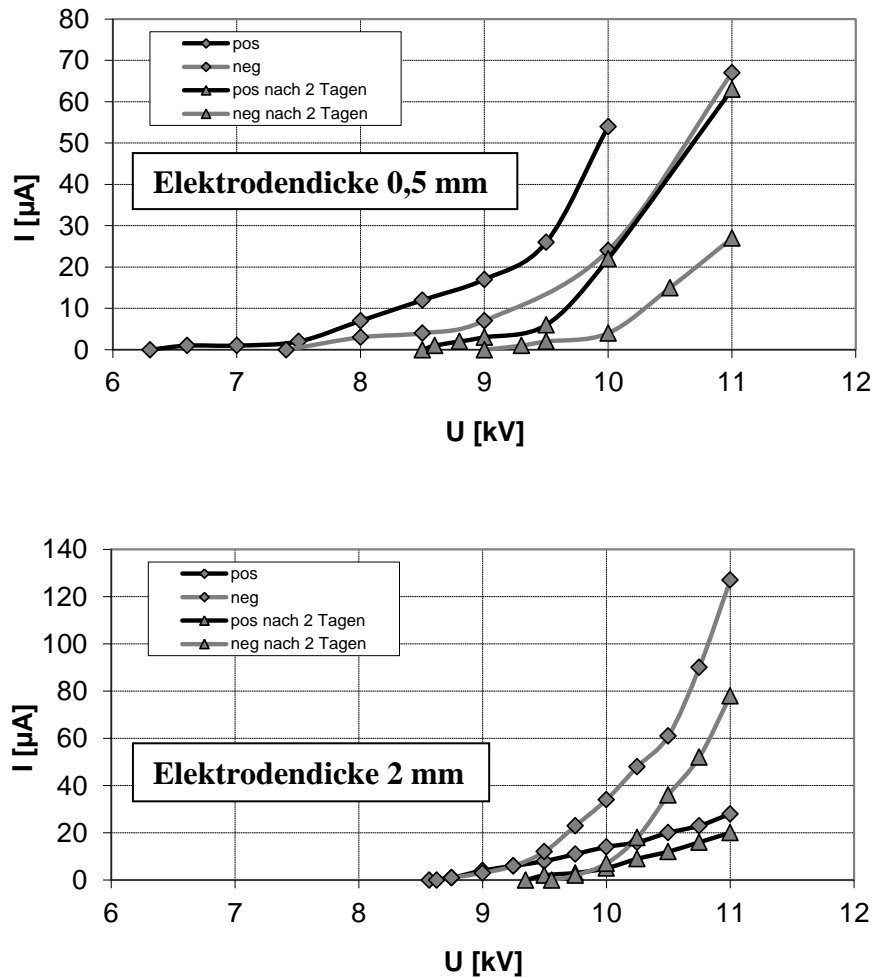


Abbildung 8-7 Änderung von Strom-Spannungskennlinien des Plattenpakets nach einem zweitägigen Betrieb

Aus den Strom-Spannungskurven ist es ersichtlich, dass die Einsatzspannung bei 2 mm Elektrodendicke etwas höher liegt, als bei der 0,5 mm Ausführung.

Die Messungen des Verlaufes des elektrischen Potentials der PFE haben einen sehr instabilen Verlauf der Betriebsspannung des Plattenpakets mit 0,5 mm Elektrodenstärke gezeigt, siehe Abbildung 8-8. Dieser Verlauf wird evtl. durch das Abtropfen von abgeschiedenem Öl verursacht. Bei dem Elektroden-Paket mit 2 mm Blechstärke wurde kein Einfluss des Abtropfens festgestellt. Dieses Paket wurde für die Durchführung weiterer Versuche ausgewählt.

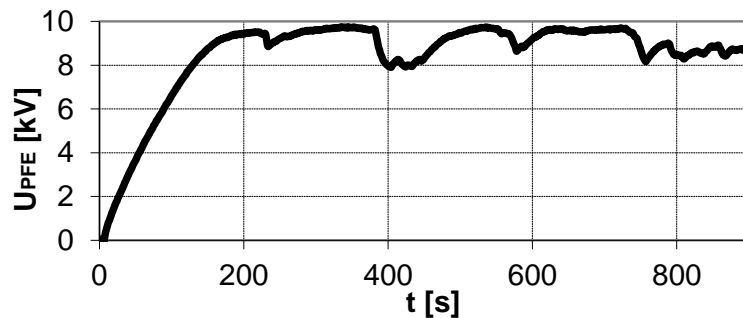


Abbildung 8-8 Verlauf des elektrischen Potentials der PFE bei der Aufladung und im Laufe des Betriebs. 0,5 mm-Ausführung des Plattenpakets. Einsatzspannung der Entladestrecke 9,5 kV

Die gemessenen Aufladegeschwindigkeiten bei dem 2mm-Plattenpaket bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen sind in der Abbildung 8-9 dargestellt. Der Potentialanstieg ist nicht linear und wird mit steigender Spannung langsamer. Als Ursache dafür kann der Einfluss des PFE-Potentials auf die Einstromung in den Ladungskollektor, auf die erhöhte Teilchenabscheidung am Strömungsverteiler und auf die erhöhten Ladungsverluste über Isolatoroberflächen sein.

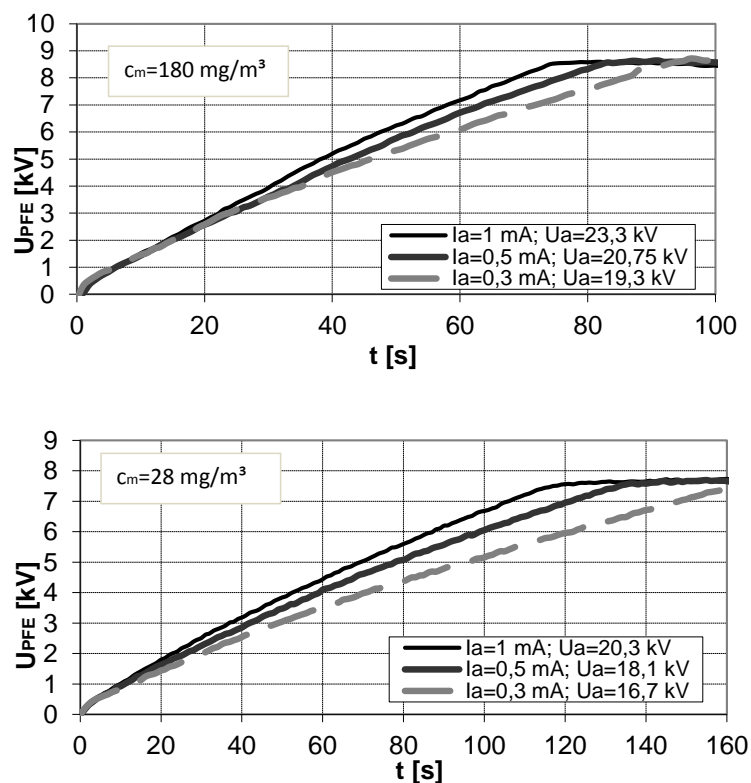


Abbildung 8-9 Aufladung der PFE bei verschiedenen Aufladerparametern. Plattendicke 2mm, Einsatzspannung der Entladestrecke 8,5 kV

Bei niedriger Aerosolkonzentration von 28 mg/m^3 dauert die Aufladung etwa doppelt so lange als im Fall eines hochkonzentrierten Aerosols (180 mg/m^3). Das Betriebspotential wird innerhalb von 1-2 Minuten erreicht.

8.1.3 Messung der Trennkurven

Die Messungen von Trennkurven erfolgten mit einem SMPS und dem im Kapitel 6.1.4 dargestellten Verdünnungssystem am Austritt aus der Anlage. Während der Messungen wird der Schwebstofffilter ausgebaut. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8-10 gezeigt. Insgesamt wird eine Abscheideleistung analog zur ARA-Laboranlage beobachtet. Es werden Abscheidegrade von bis zu 99,9 Prozent über den gesamten Partikelgrößenbereich gemessen.

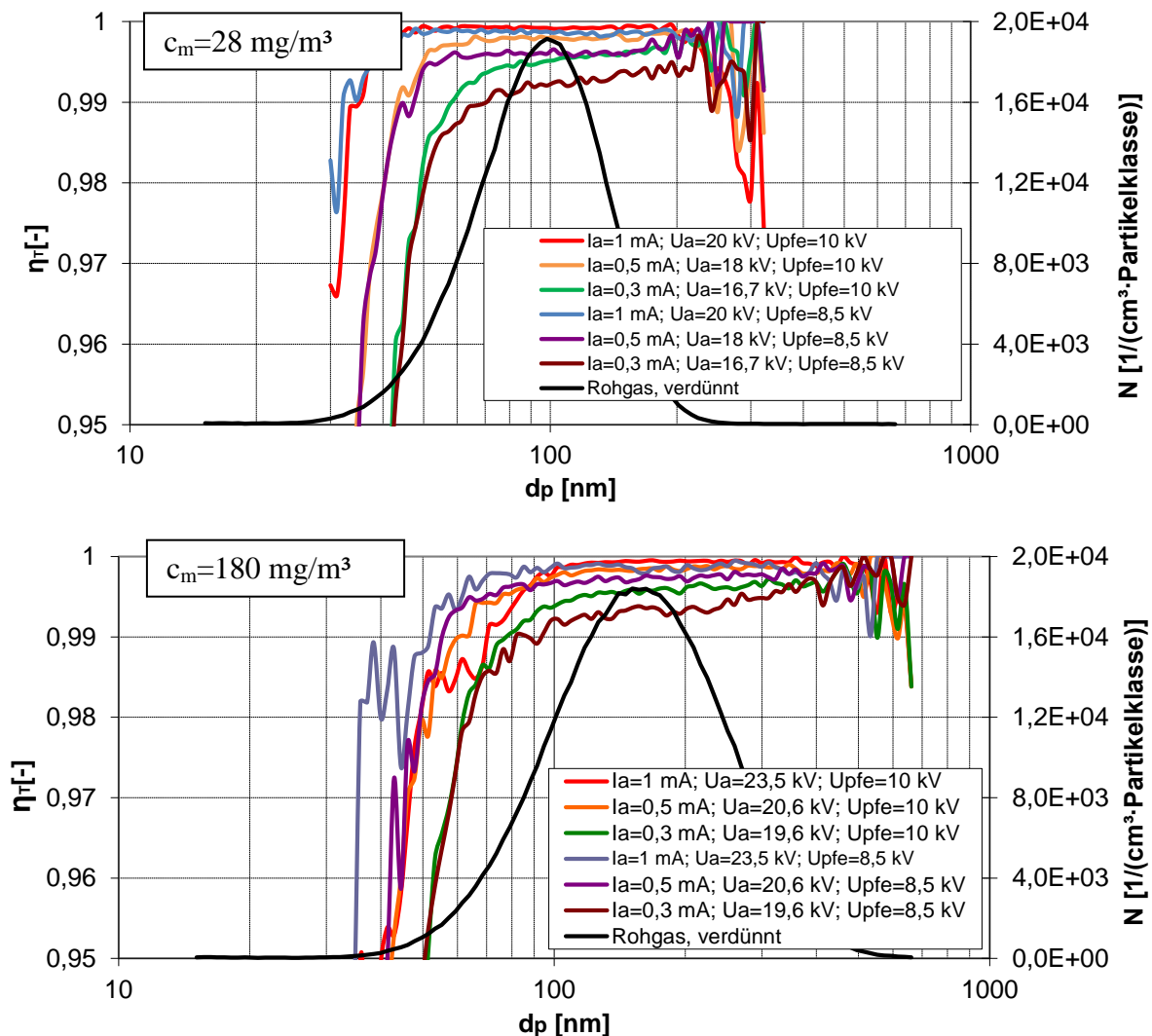


Abbildung 8-10 Trennkurven, gemessen am Austritt aus dem ARA-Prototyp bei verschiedenen Aerosolkonzentrationen. Volumenstrom 1000 m³/h

8.1.4 Versuch zur Unterdrückung des Corona-Stroms im Plattenpaket durch die Beschichtung von Elektrodenkanten mit Isolierlack

Wie im Kapitel 5.3.1 erwähnt, hängt die maximale Spannung der PFE auch von dem elektrischen Strom ab, der durch die Entladungen im Plattenpaket verursacht wird. Als die für die Entladungsbildung anfälligste Stelle werden die Elektrodenkanten gesehen. Durch das Anschweißen von rohrförmigen metallischen Profilen an die Elektrodenkanten wurden in der Kollektorelektrode der Laboranlage Feldstärken bis zu 8 kV/cm erreicht. Allerdings ist das

Anbringen von Profilen technisch sehr aufwendig und bei großen Plattenzahlen und kleinen Plattenabständen kaum realisierbar. Als eine andere Option, die Entladungen an den Elektrodenkanten zu unterdrücken, wurde ein Versuch unternommen, diese mit einem Isolierlack mit hoher Durchschlagfestigkeit (40-60 kV/mm) zu beschichten.

Aufgrund der kleinen Elektrodendicke (ggf. 0,5 mm) konnte keine vollständige Beschichtung der Kanten gewährleistet werden. An einigen Stellen ragte die metallische Elektrodenoberfläche aus der Lackschicht heraus. Als Ergebnis wurde eine drastische Senkung der Corona-Einsatzspannung und Erhöhung des Stromflusses im Plattenpaket festgestellt, siehe Abbildung 8-11. Als Ursache dafür kann ein wechselwirkender Effekt angesehen werden, der durch die Anlagerung von Ladungen der zur Elektrode entgegengesetzten Polarität auf der Isolierschicht und somit zur Verstärkung des elektrischen Feldes an der Kante führt (wie in der Abbildung 8-12 für die PFE-Kante schematisch dargestellt). Ein sehr geringer und auch bei kleinen Spannungen vorhandener Stromfluss an verunreinigten Stellen der Elektroden liefert Ladungen, die sich an der Lackschicht ansammeln und das Feld an der Kante verstärken, so dass eine von der Kante ausgehende Entladung gezündet wird. Im nächsten Schritt pendelt die Entladung auf die gleiche Weise zur Gegenelektrode.

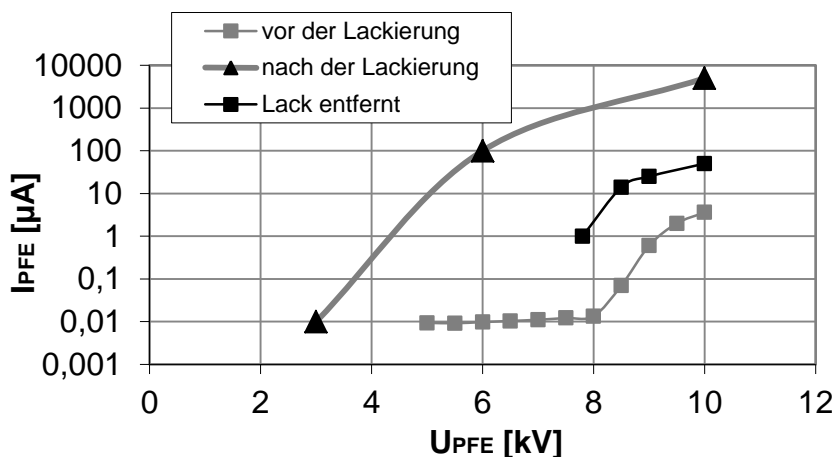


Abbildung 8-11 Strom-Spannungs-Kennlinien des Plattenpakets vor und nach der Lackierung von Elektrodenkanten

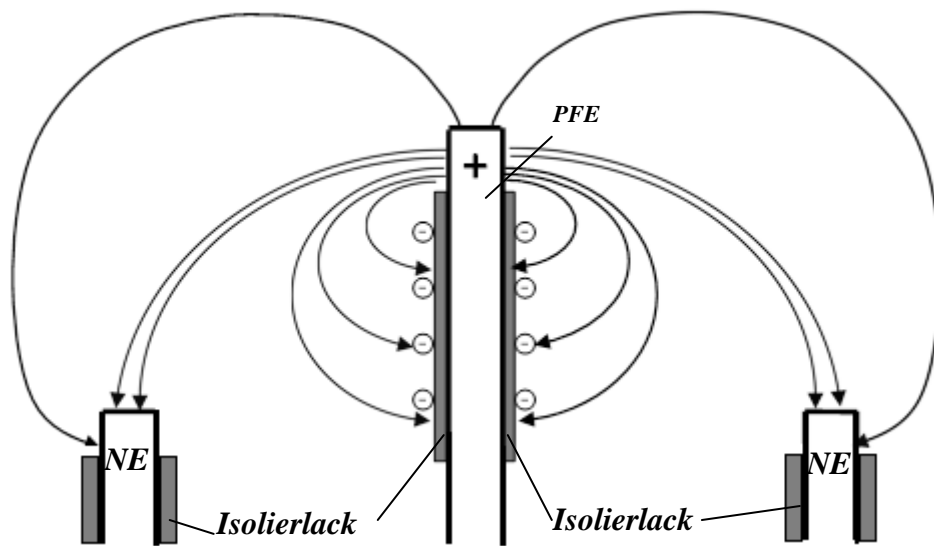


Abbildung 8-12 Schematische Darstellung der Entwicklung des elektrischen Feldes an den mit Isolierlack beschichteten Elektrodenkanten

8.1.5 Versuche zur Beurteilung der elektrischen Isolation

Die eingesetzten Polyamid-Isolatoren werden während des Betriebes dem partikelbeladenen Gas ausgesetzt. Nach zwei Wochen Betrieb wurde ein Experiment analog zu dem im Kapitel 6.2.6 durchgeführt. Während des Stillstandes der Anlage wurde die potentialfreie Elektrode manuell aufgeladen und der zeitliche Abfall der Spannung wurde aufgezeichnet, siehe Abbildung 8-13.

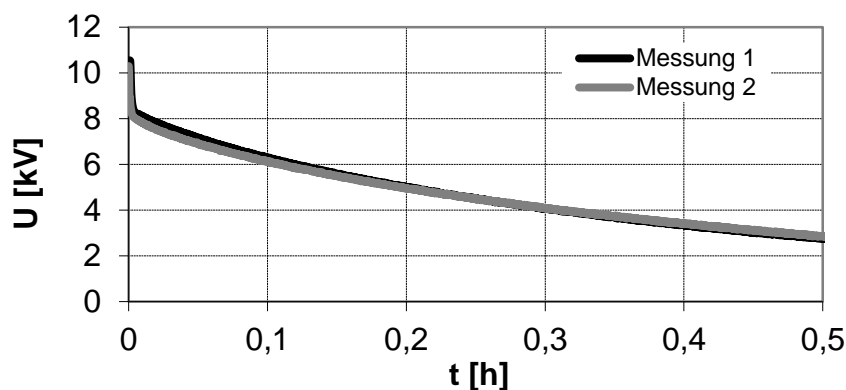


Abbildung 8-13 Zeitlicher Verlauf des Potentials der PFE beim ausgeschalteten Auflader

Bei der gemessenen elektrischen Kapazität der Elektrodenanordnung von 10,4 nF lässt sich die Abhängigkeit des Anordnungs-Gesamtwiderstandes von der angelegten Spannung wie in der Abbildung 8-14 dargestellt berechnen. Solange keine Entladungen auftreten, wird ein konstanter Widerstandsverlauf beobachtet. Der Isolationsgesamtwiderstand beträgt ca. 10^{11} Ohm.

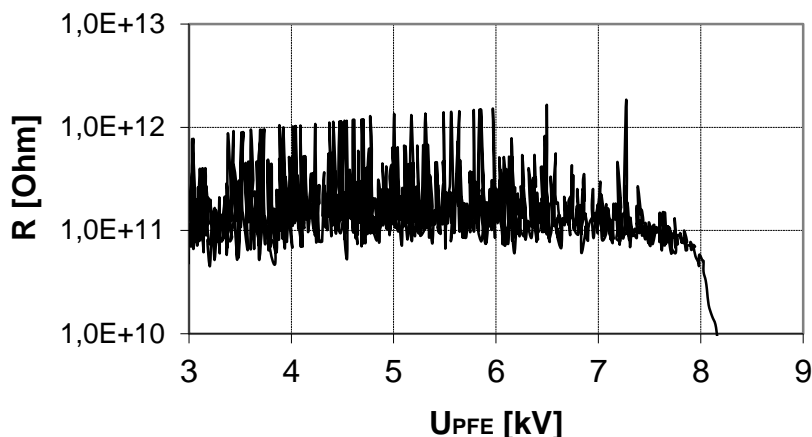


Abbildung 8-14 Gesamt Widerstand der Elektrodenanordnung als Funktion der Spannung

Um die Beständigkeit der Polyamid-Isolatoren bezüglich der Oberflächen-Entladungen zu überprüfen, wurde ein Experiment analog zum in der Abbildung 8-4 dargestellten Montageschema aufgebaut. An die PFE wurde die Hochspannung von ca. 30 kV angelegt (die Betriebsspannung wurde dabei dreifach überschritten), um die Entladungen hervorzurufen. Nach mehreren Stunden wurde die Strom-Spannungskennlinie der Anordnung erneut aufgenommen. Zwar wurden unter dem Mikroskop stellenweise Verfärbungen der Isolatoroberfläche beobachtet, aber die Bildung von elektrischen „Bäumen“ wurde nicht nachgewiesen und es wurde keine messbare Veränderung der Oberflächenleitfähigkeit festgestellt.

8.1.6 Messung der Ozonkonzentration

Die Ergebnisse der Messung der Ozonkonzentration bei verschiedenen Aufladerparametern sind in der Abbildung 8-15 dargestellt. Die Ergebnisse sind analog zu den Laboruntersuchungen: Bei negativer Auflader-Polarität wird der MAK-Wert für Ozon (0,1 ppm) bereits bei 1,5 mA Aufladerstrom überschritten. Bei positiver Corona Ozon-Werte im zulässigen Bereich.

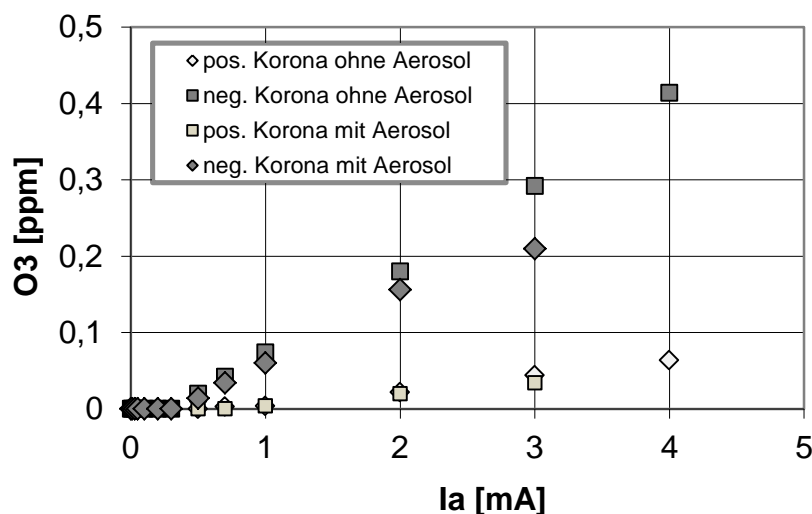


Abbildung 8-15 Ozonkonzentration mit und ohne Aerosol bei positiver und negativer Aufladerpolarität. Drahradius 0,25 mm; Drahtlänge 4,2 m; Abstand Draht-Wand 5 cm; Volumenstrom 1000 m³/h; Massenkonzentration 180 mg/m³

Bei der Messung mit Aerosol wird eine Senkung der Ozon-Emission beobachtet.

Bei ausgeschaltetem Auflader und an die PFE angelegter Spannung wurde im ganzen Betriebsspannungsbereich (bis 10 kV) kein Ozon gemessen.

8.2 3-D-Modellierung der ARA-Stufe

Ziele der Simulation

Zur Nachprüfung und Veranschaulichung der Funktionsweise des autogenen raumladungsgetriebenen Abscheiders wird eine 3-D-Simulation der 2.Stufe des ARA-Prototyps realisiert. Simuliert wird der in der Abbildung 8-16 dargestellte Anlagenbereich. Die Laufzeit der Simulation beschränkt sich auf das Erreichen des Betriebspotentials an der potentialfreien Elektrode.

Die Simulation erfolgt mit Hilfe des Simulationssoftwarepakets OpenFOAM. Der Solver für die EHD-Strömung wird auf der Basis des Standard-Solvers pimpleFOAM für inkompressible hydrodynamische Strömung, das nach dem Algorithmus PIMPLE (PISO + SIMPLE) funktioniert, entwickelt.

Im Gegensatz zur ARA-Laboranlage tritt im ARA-Prototyp das geladene Aerosol nicht sofort in einen feldfreien Raum der Ladungs-Kollektorelektrode, sondern muss zuerst den Bereich mit einer sehr hohen Feldstärke überwinden. Hier treten elektrohydrodynamische Effekte auf, die die PFE-Aufladung beeinflussen können. Im Laufe der Aufladung der PFE steigt die Feldstärke am Aerosoleinlass (Strömungsverteiler), was zu einer erhöhten Teilchenabscheidung an dieser Stelle führen kann.

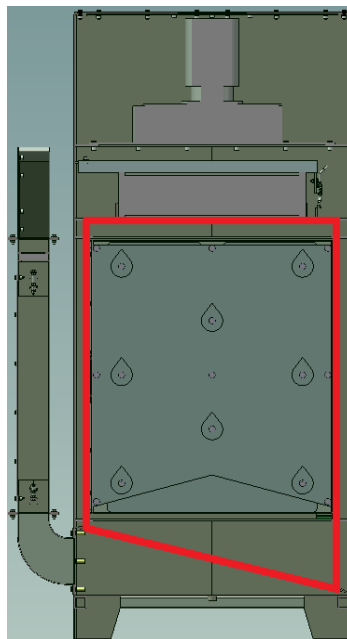


Abbildung 8-16 Der zu modellierende Anlagenbereich

8.2.1 Gleichungssystem

Hier werden die grundlegenden Gleichungen für die Berechnung der EHD-Strömung in der ARA-Stufe vorgestellt. Beispiele der Modellierung der durch eine Corona-Entladung verursachten EHD-Strömung sind in [Kar08, Lar09] zu finden.

Die Gleichung von Poisson für das elektrische Potential φ [V] im Fall, wenn eine partikelgebundener Raumladung vorliegt, folgt:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho_p}{\varepsilon_0}, \quad 8-1$$

mit ρ_p – Raumladungsdichte der Teilchen [C/m³] und ε_0 – Dielektrizitätskonstante des Vakuums. Das elektrische Potential wird durch die Feldstärke definiert:

$$E = -\nabla \varphi \quad 8-2$$

Der Transport von geladenen Teilchen erfolgt ggf. sowohl mit der Gasströmung als auch im elektrischen Feld. Damit kann die Teilchenstromdichte unter Vernachlässigung der Diffusion als

$$\vec{J}_p = Z_p \rho_p \vec{E} + \vec{u} \rho_p \quad 8-3$$

gefunden werden, mit \vec{u} -Vektor der Strömungsgeschwindigkeit. Aus der Bedingung der Stromkontinuität ergibt sich die Gleichung

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \bullet \vec{J}_p = 0. \quad 8-4$$

Die Strömungsdynamik wird mit der Navier-Stokes Gleichung für eine inkompressible instationäre laminare Strömung beschrieben:

$$\rho_{Luft} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_{Luft} \vec{u} \bullet \nabla \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} - \rho_p \nabla \varphi, \quad 8-5$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \bullet \vec{u} = 0. \quad 8-6$$

mit ρ_{Luft} - Luftdichte, μ - dynamische Viskosität der Luft, p - Luftdruck.

8.2.2 Berechnungsalgorithmus

Das Berechnungsmodell funktioniert nach dem in der Abbildung 8-17 dargestellten Algorithmus. Die Auswahl des Zeitschrittes erfolgt durch die Berechnung der Courant-Zahl, dabei gilt: $CFL = u \cdot \Delta x / \Delta t$, die Bedingung $CFL < 1$ muss erfüllt sein. Während eines Zeitschrittes wird zuerst durch die Lösung der Gleichungen 8-1 und 8-2 das Profil des elektrischen Feldes anhand der gegebenen Partikelraumladungsdichte berechnet. Danach

erfolgt die Berechnung des Raumladungs-Feldes nach den Gleichungen 8-3 und 8-4. Die Berechnung erfolgt für 36 Klassen (sechs Partikelgrößen mit jeweils sechs Ladungsklassen). Die Ermittlung der Eingangsdaten wird im Kapitel 8.2.5 durchgeführt. Anschließend wird mit Hilfe von Gleichungen 8-5 und 8-6 das \vec{u} Feld berechnet.

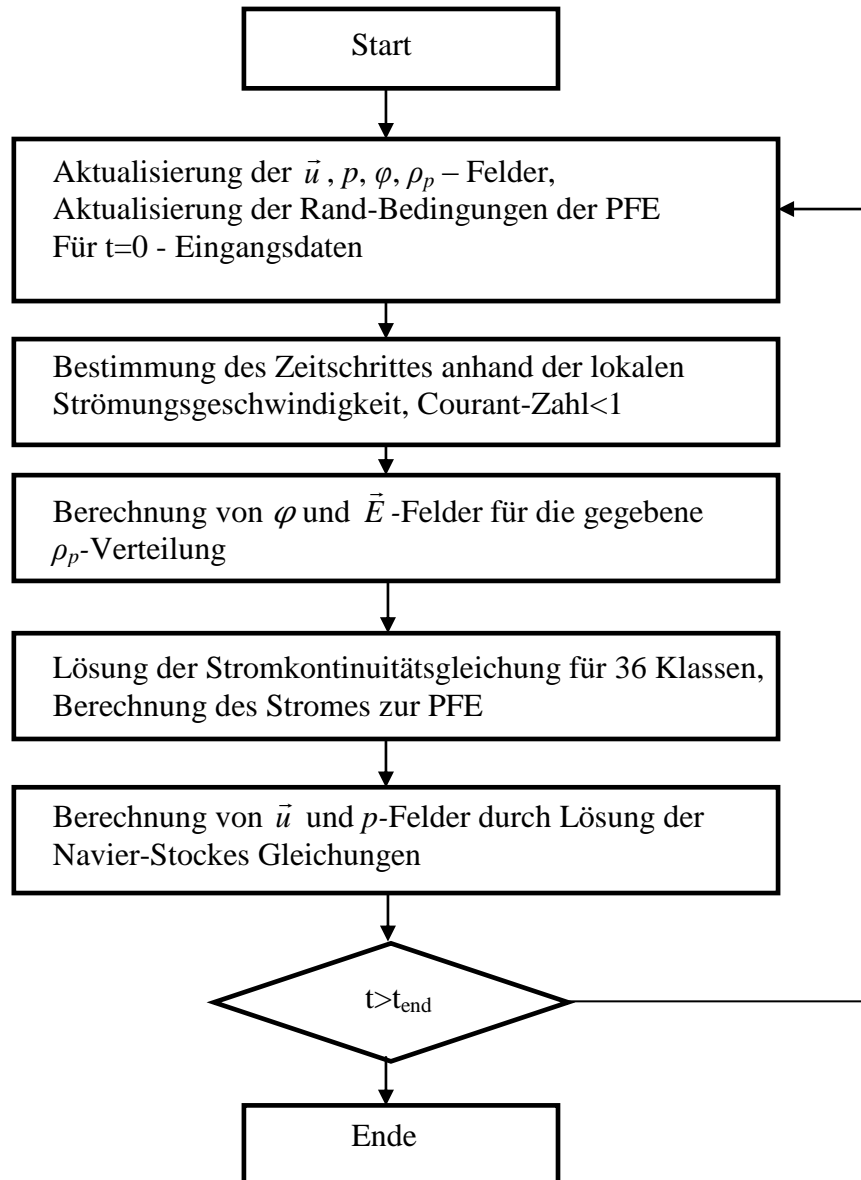


Abbildung 8-17 Berechnungsalgorithmus

8.2.3 Die Geometrie und das Gitternetz

Die Modell-Geometrie entspricht der Geometrie der 2.Stufe des ARA-Prototyps und ist in Abbildung 8-18 bis Abbildung 8-20 in drei Dimensionen dargestellt. Mit rot wird der jeweilige Querschnitt angezeigt.

Das Modell beschreibt die 2.Ausführung des Plattenpakets mit 2 mm Elektrodenstärke. Die Elektroden-Geometrie wird vereinfacht. Die Öffnungen und Kanten-Abrundungen (siehe die Abbildung 8-3) werden vernachlässigt.

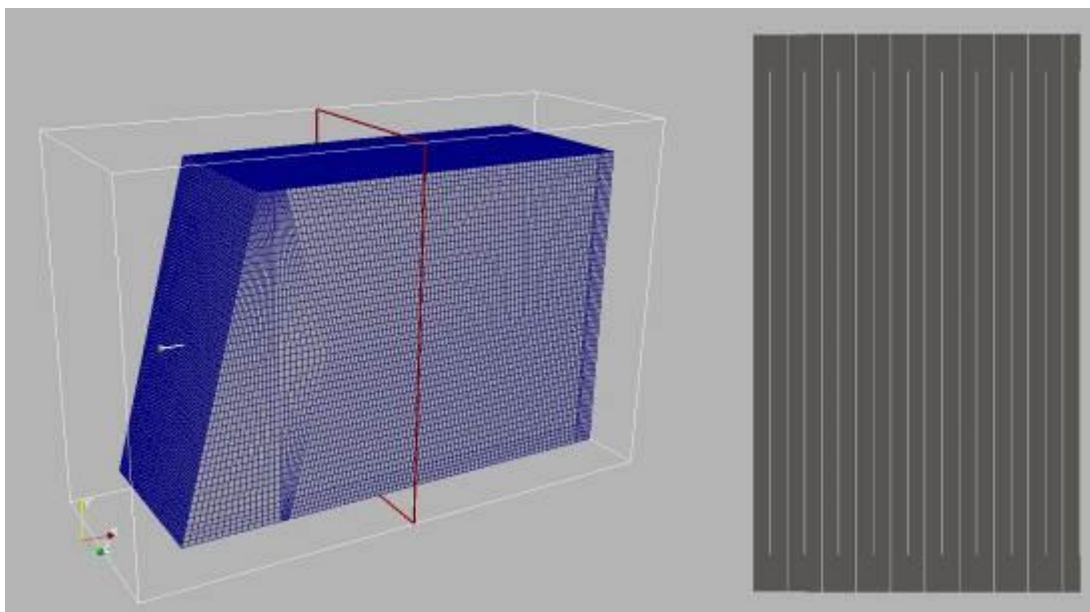


Abbildung 8-18 ARA-Modellgeometrie im Schnitt über die X-Achse

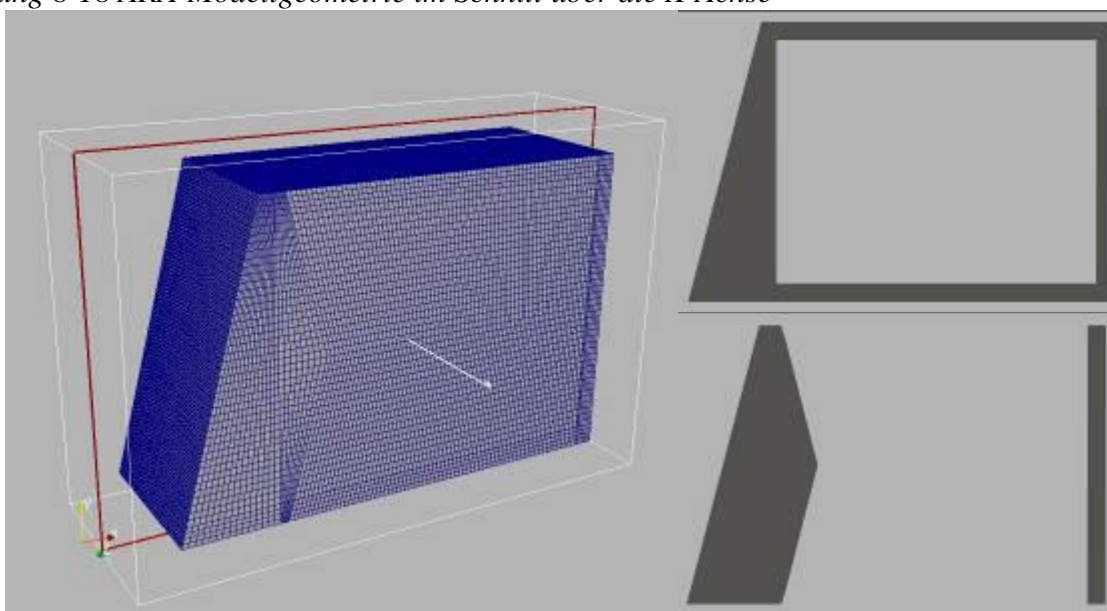


Abbildung 8-19 ARA-Modellgeometrie im Schnitt über die Z-Achse. Rechts oben – Schnitt über die potentialfreie Elektrode, rechts unten – Schnitt über die Niederschlagselektrode

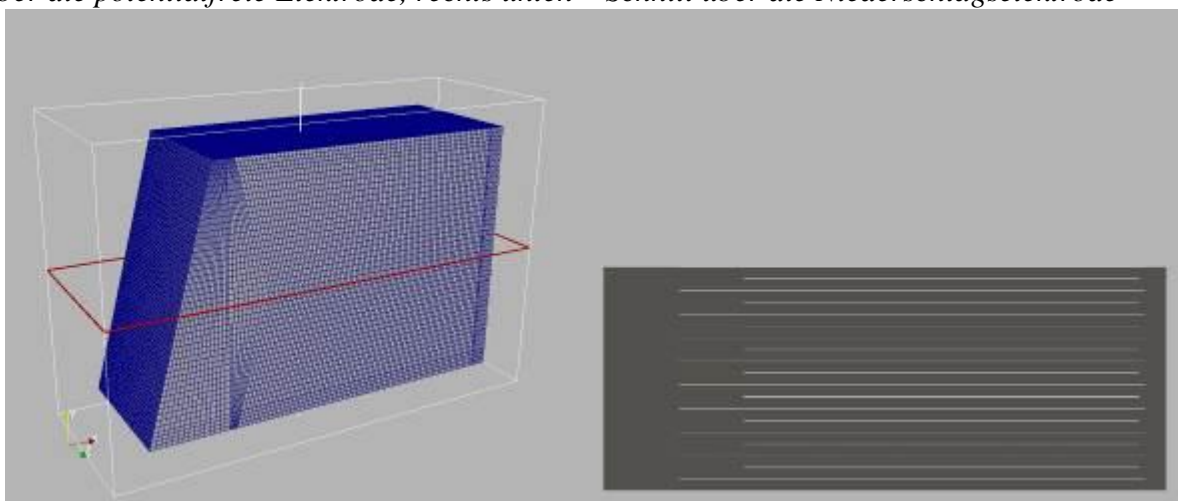


Abbildung 8-20 ARA-Modellgeometrie im Y-Schnitt

Es wird mit zwei Gitternetzen gerechnet, die verschiedene Auflösungen haben und entsprechend unterschiedlich lange Rechenzeiten benötigen (Tabelle 5).

Aufgrund des in der Richtung Z-Achse symmetrischen Aufbaus wird das halbe Volumen der ARA-Stufe modelliert.

Gitternetz	Grob	Fein
Zellenanzahl	393760	6282940
Maximale Zellenschiefe	0,703125	0,72794
Zellengröße, X-Achse	5 bis 10 mm	2 bis 5 mm
Zellengröße, Y-Achse	5 mm	max. 2 mm
Zellengröße, Z-Achse	5 mm	max. 2 mm

Tabelle 5 Daten der verwendeten Gitternetze

8.2.4 Modell-Parameter und Randbedingungen

Die Modellparameter und Konstanten sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Modell-Parameter	Wert
Luftdichte ρ_{Luft}	1,205 kg/m ³
Kinematische Viskosität der Luft ν_{Luft}	1,511·10 ⁻⁵ m ² /s
Elementarladung e	1,6·10 ⁻¹⁹ C
Feldkonstante ε_0	8,85419·10 ¹² As/Vm

Tabelle 6 Konstanten für die Berechnung

Die schematische Darstellung der Modell-Geometrie mit der Kennzeichnung der Grenzen ist in der Abbildung 8-21 zu sehen. Die „Einlass“-Fläche entspricht dem gitterförmigen Strömungsverteiler. Die Flächen „Oberer Rand“, „Unterer Rand“ und „Seitenwand“ stellen das Gehäuse der Anlage dar.

Die Modell-Randbedingungen sind in der Tabelle 7 dargestellt.

	Niederschlags- elektrode	Potentialfreie Elektrode	Oberer Rand, unterer Rand, Seitenwände	Einlass	Auslass
Elektrisches Potential	$\varphi = 0$	$\varphi_{i+1} = \frac{I^+ \cdot \Delta t}{C} + \varphi_i$	$\varphi = 0$	$\varphi = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$
Raumladungs- dichte	$\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$	$\rho = const$	$\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$
Strömungs- geschwindigkeit	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$u = const$	$\frac{\partial u}{\partial n} = 0$
Druck	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$p = const$

Tabelle 7 Randbedingungen für die Modellierung der ARA-Stufe

Der mit der Raumladungsdichte transportierte Strom dient der Aufladung der potentialfreien Elektrode (Gl. 8-3). Es wird dabei nur positiver Stromfluss berücksichtigt, der in Richtung Elektrodenoberfläche gerichtet ist. Für die elektrische Kapazität der gesamten Elektrodenanordnung wird der gemessene Wert von 10,4 nF eingesetzt.

Die im Plattenpaket zu erwartende Strömung ist laminar. Diffusion und Koagulation werden in dem Modell nicht berücksichtigt. Aufgrund von der in der Anlaufstrecke vorliegenden turbulenten Strömung wird die Annahme gleichmäßiger Aerosolverteilung am Austritt aus dem Strömungsverteiler getroffen.

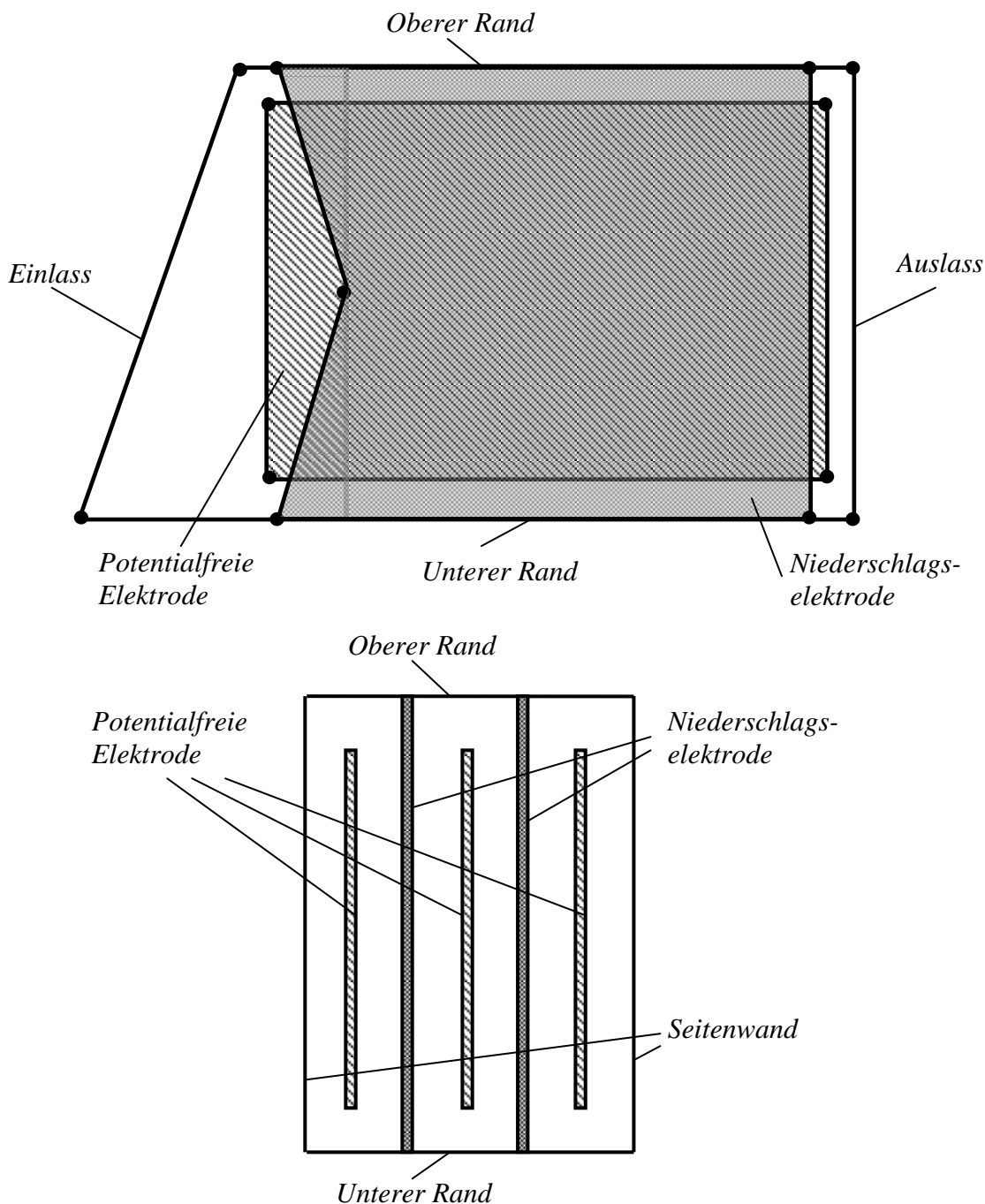


Abbildung 8-21 Schematische Darstellung der implementierten Geometrie. Oben: Seitenansicht, unten: Querschnitt

8.2.5 Ermittlung der Modell-Ausgangsdaten

Die Ermittlung von Ausgangsdaten erfolgt in mehreren Schritten. Anhand der gemessenen Modell-Partikelgrößenverteilung (Abbildung 8-22) werden nach dem Modell von Lübbert die Ladungsverteilungen für jeweilige Partikelklassen (ggf. sechs Klassen) am Austritt aus dem Auflader berechnet, siehe Abbildung 8-23.

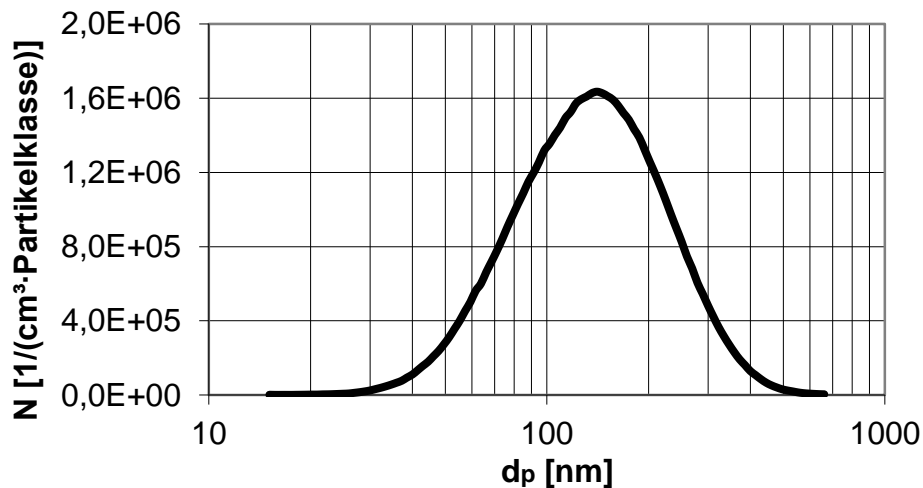


Abbildung 8-22 Modell-Partikelgrößenverteilung. Ermittelt am Eintritt in den Auflader. Volumenstrom $1000 \text{ m}^3/\text{h}$; Massenkonzentration $180 \text{ mg}/\text{m}^3$; Anzahlkonzentration $5,87 \cdot 10^{13} \text{ l}/\text{m}^3$

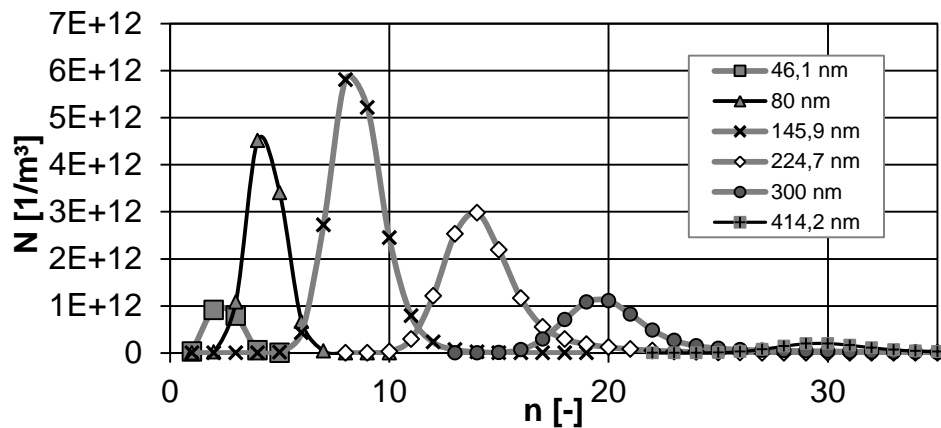


Abbildung 8-23 Berechnete Anzahl-Ladungsverteilungen. Sechs Partikelklassen; 35 Ladungsklassen; Aufladerspannung $20,7 \text{ kV}$; Einsatzspannung $11,3 \text{ kV}$; Drahradius $0,25 \text{ mm}$; Rohrradius $0,056 \text{ m}$; Verweilzeit im Auflader $0,151 \text{ s}$

Für die Reduzierung des Rechenaufwandes wird die Menge der Ladungsklassen pro Partikelgröße auf sechs Klassen reduziert. Die Verteilungen der Raumladungsdichte über die elektrische Teilchenmobilität sind in Abbildung 8-24 dargestellt.

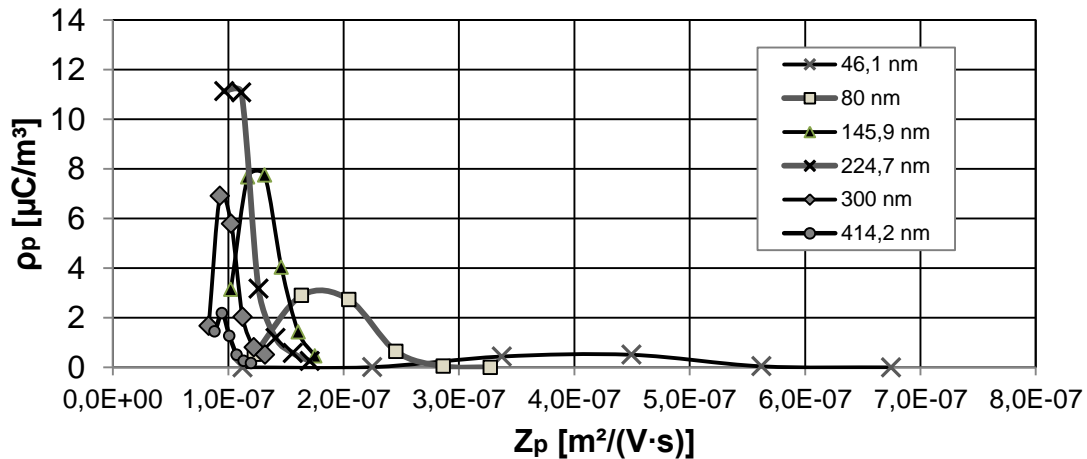


Abbildung 8-24 Berechnete Raumladungsdichte-Mobilitätsverteilungen am Austritt aus dem Auflader. Sechs Partikelklassen, sechs Ladungsklassen; Aufladerspannung 20,7 kV; Einsatzspannung 11,3 kV; Drahradius 0,25 mm; Rohrradius 0,056 m; Verweilzeit im Auflader 0,151 s

Im nächsten Schritt wird durch die Lösung der Differentialgleichung für die elektrostatische Dispersion von polydispersen polygeladenen Partikeln unter Annahme idealer Quervermischung die Partikelkonzentrationen nach der Aerosolaufenthalt in der Anlauf-Strecke vor dem Strömungsverteiler berechnet. Bei einem Volumenstrom von 1000 m³/s und dem Volumen der Anlaufstrecke von 0,111 m³ ergibt sich die Verweilzeit von 0,39 s. Dabei gilt:

$$\frac{dc_{k,j}}{dt} = -\frac{B_k}{\varepsilon_0} \cdot (c_0)_{k,j} \cdot n_{k,j} \cdot e \cdot \sum_{k=1}^{k_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} c_{k,j} n_{k,j} e, \quad 8-7$$

mit k - Partikelgrößenklasse, j - Partikelladungsklasse.

Die ermittelten Raumladungsdichte-Mobilitätsverteilungen gelten als die Ausgangsdaten für die Simulation, siehe Abbildung 8-25. Damit wird die Berechnung des Stromflusses (Gleichung 8-3) in 36 Klassen unterteilt. Für die Berechnung des φ -Feldes wird die Gesamtraumladungsdichte an der lokalen Position verwendet.

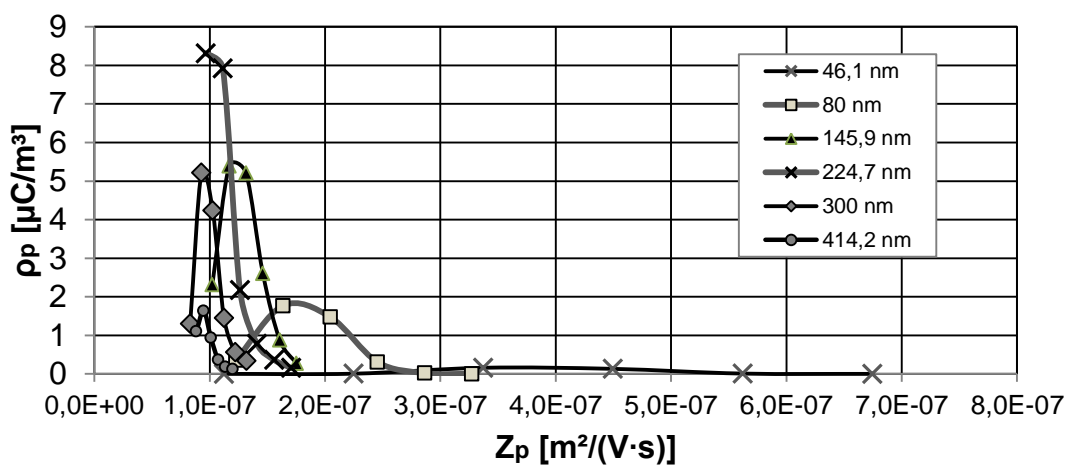


Abbildung 8-25 Berechnete Raumladungsdichte-Mobilitätsverteilungen nach der Anlauf-Strecke. Verweilzeit in der Strecke 0,39 s. 36 Klassen

8.2.6 Simulationsergebnisse

Aufladung der potentialfreien Elektrode. Vergleich mit Messungen

Das Volumen der Ladungs-Kollektorelektrode, das sich aus den nicht überlappenden Oberflächen von potentialfreien- und Niederschlagselektroden und der gesamten Paketbreite ergibt, ist gleich $0,043 \text{ m}^3$. Bei einem Volumenstrom von $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich eine Verweilzeit von $0,155 \text{ s}$. Bei einer Gesamtkonzentration am Eingang des Kollektors von $2,63 \cdot 10^{13} \text{ 1/m}^3$, einer mittleren Partikelgröße von 130 nm und einer mittleren Ladung pro Teilchen von $10,9$ (ermittelt auf der Basis vom Lübbertschen Modell und von der Gleichung für die elektrostatische Dispersion), lässt sich die Aufladungszeit der PFE auf die Spannung von $8,5 \text{ kV}$ entsprechend der Gleichung 5-9 als $2,25 \text{ s}$ berechnen, was sehr weit von dem gemessenen Wert von etwa 80 s liegt. Der Grund dafür ist, erstens, die Annahme homogener Ladungsverteilung während der analytischen Berechnung. Die reale Ladungsverteilung ist inhomogen und die Verluste der Raumladungsdichte während des Transports zur LKE sind deutlich höher, als berechnet. Zweitens, ist der reale Potential-Anstieg nicht linear und wird durch elektrohydrodynamische Effekte am Eintritt in die Ladungs-Kollektorelektrode und durch die Erhöhung der Teilchenverluste am Strömungsverteiler verlangsamt.

Im Gegensatz zur analytischen Abschätzung zeigen die Simulationsergebnisse eine viel bessere Genauigkeit, siehe Abbildung 8-26.

Während der Simulation 1 wird mit einem groben Gitternetz gerechnet und die Berechnung der Aufladung der PFE beginnt mit dem ersten Zeitschritt, wenn noch kein ausgebildetes Strömungsprofil vorliegt.

Im Verlauf von der Simulation 2 wird die Berechnung der Aufladung der PFE erst gestartet, wenn die Strömung sich bereits ausgebildet hat. So ein Simulations-Verlauf entspricht dem Experiment, bei dem am Beginn der PFE-Aufladung die partikelgebundene Raumladung im gesamten Elektrodenzwischenraum vorliegt.

Der Verlauf der Simulation 3 ist gleich der 2. Simulation. Das Modell mit einem feineren Gitternetz wird berechnet (die Informationen zu den Gitternetzen sind im Kapitel 8.2.3 zu finden).

Die Abbildung 8-26 (unten) zeigt die Spannungsverläufe am Beginn der Aufladung ($U_{PFE} < 1 \text{ kV}$). Es ist ersichtlich, dass der Spannungsverlauf bei den Simulationen mit ausgebildeter Strömung sehr gut mit dem gemessenen Verlauf übereinstimmt. Aufgrund der im gesamten Elektrodenzwischenraum vorliegenden Raumladung erfolgt die Partikelabscheidung bei $U_{PFE} = 0$ in Richtung potentialfreier Elektrode nicht nur im Ladungskollektor, sondern im ganzen Elektrodenpaket, was zu einem viel steileren Potentialanstieg führt. Weiterer nicht-linearer Potentialverlauf wird durch elektrohydrodynamische Effekte am Eintritt in die PFE und durch steigende Teilchenabscheidung am Strömungsverteiler verursacht.

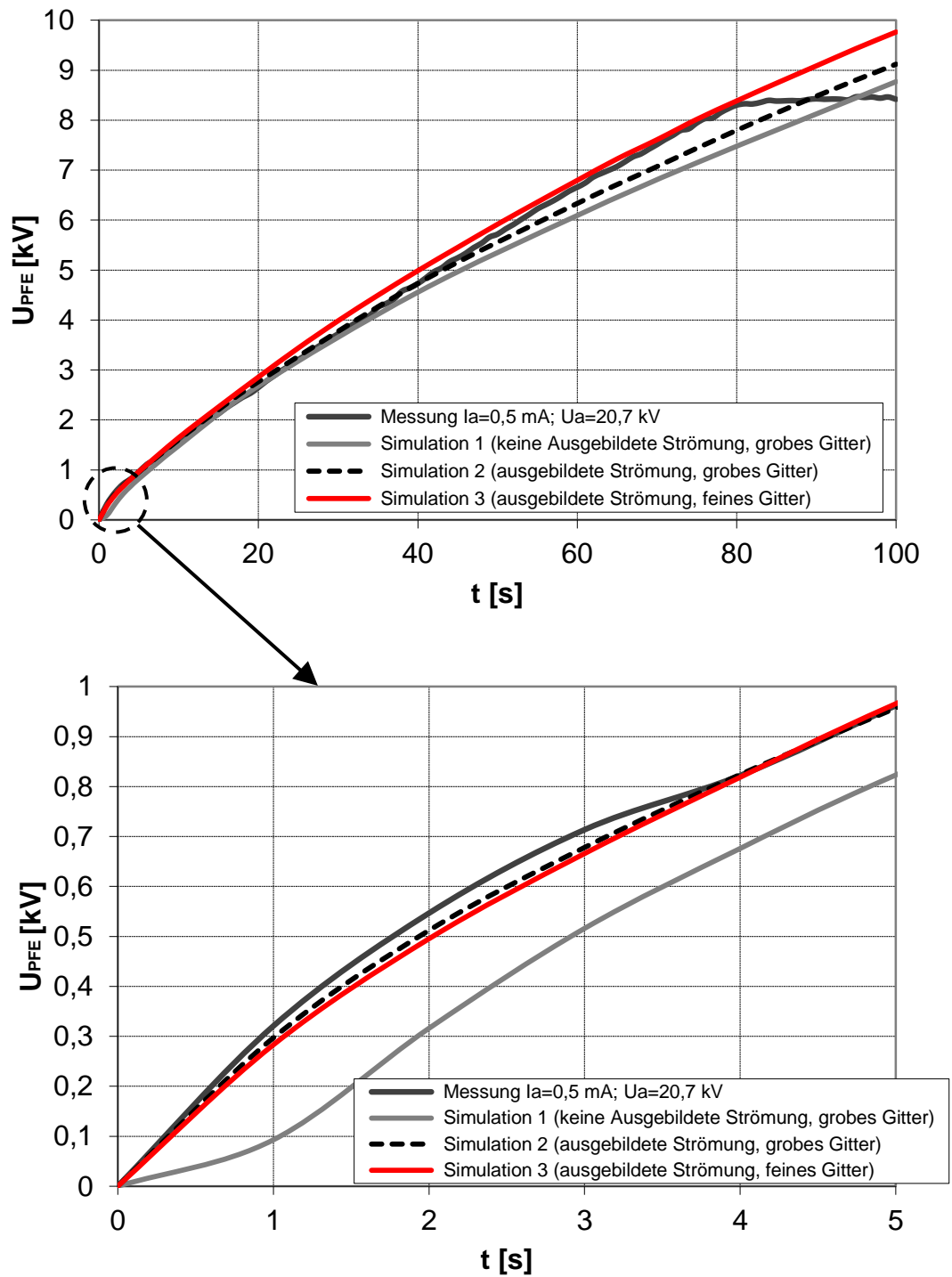


Abbildung 8-26 Vergleich der gemessenen und simulierten zeitlichen Potentialverläufe.
Unten: vergrößerte Darstellung

Die Abbildung 8-27 und Abbildung 8-28 zeigen simulierte Felder der Raumladungsdichte, elektrischer Feldstärke und der Strömungsgeschwindigkeit am Anfang ($t=0$; $U_{PFE}=0$ kV) und am Ende der Simulation ($t=80$ s; $U_{PFE}=8,39$ kV). Dargestellt wird der Y-Achsenschnitt analog zur Abbildung 8-20,

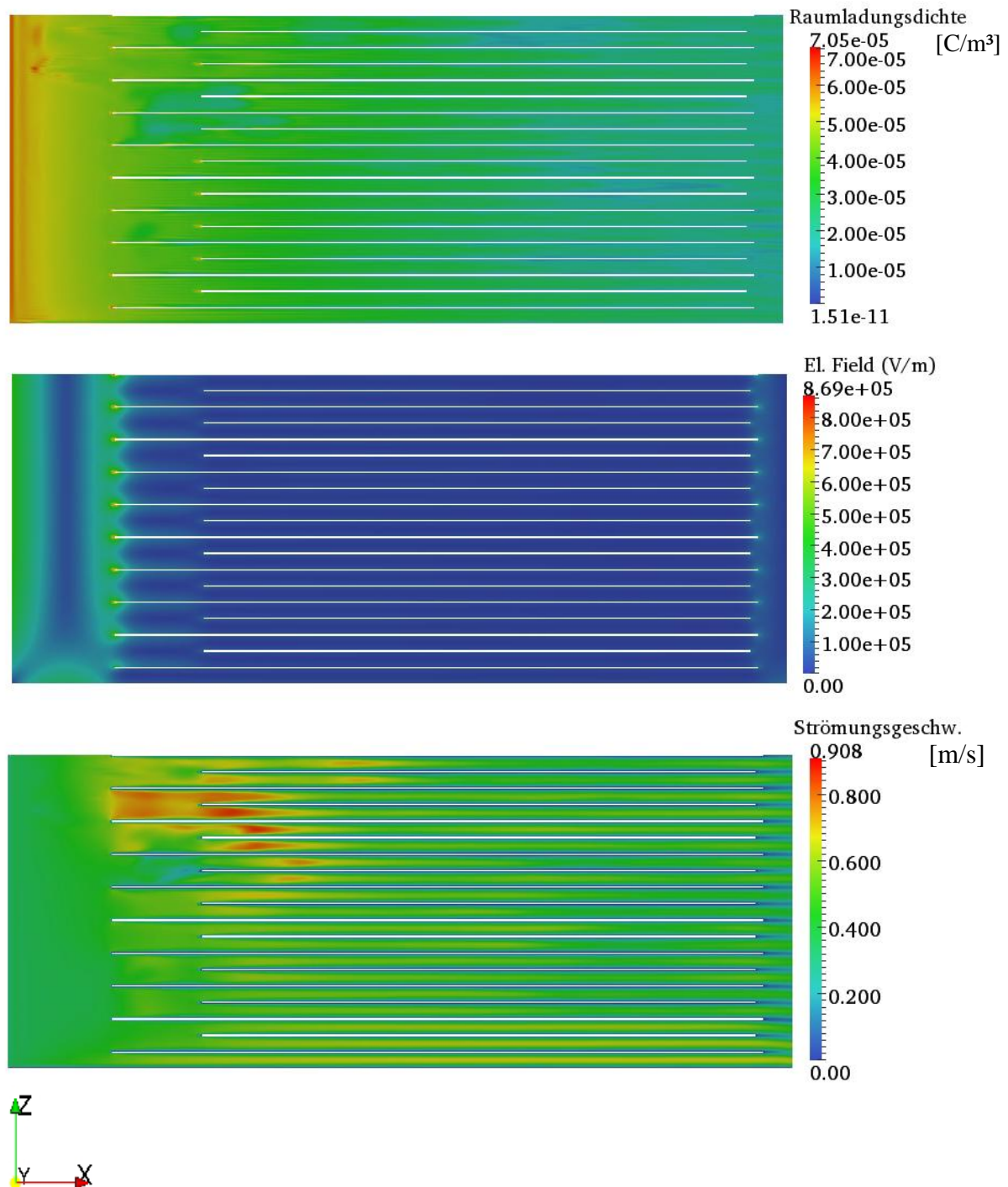


Abbildung 8-27 Modell mit ausgebildeter Strömung. Feines Gitternetz. Y-Achsenschnitt. $t=0$ s; $U_{PFE}=0$ kV

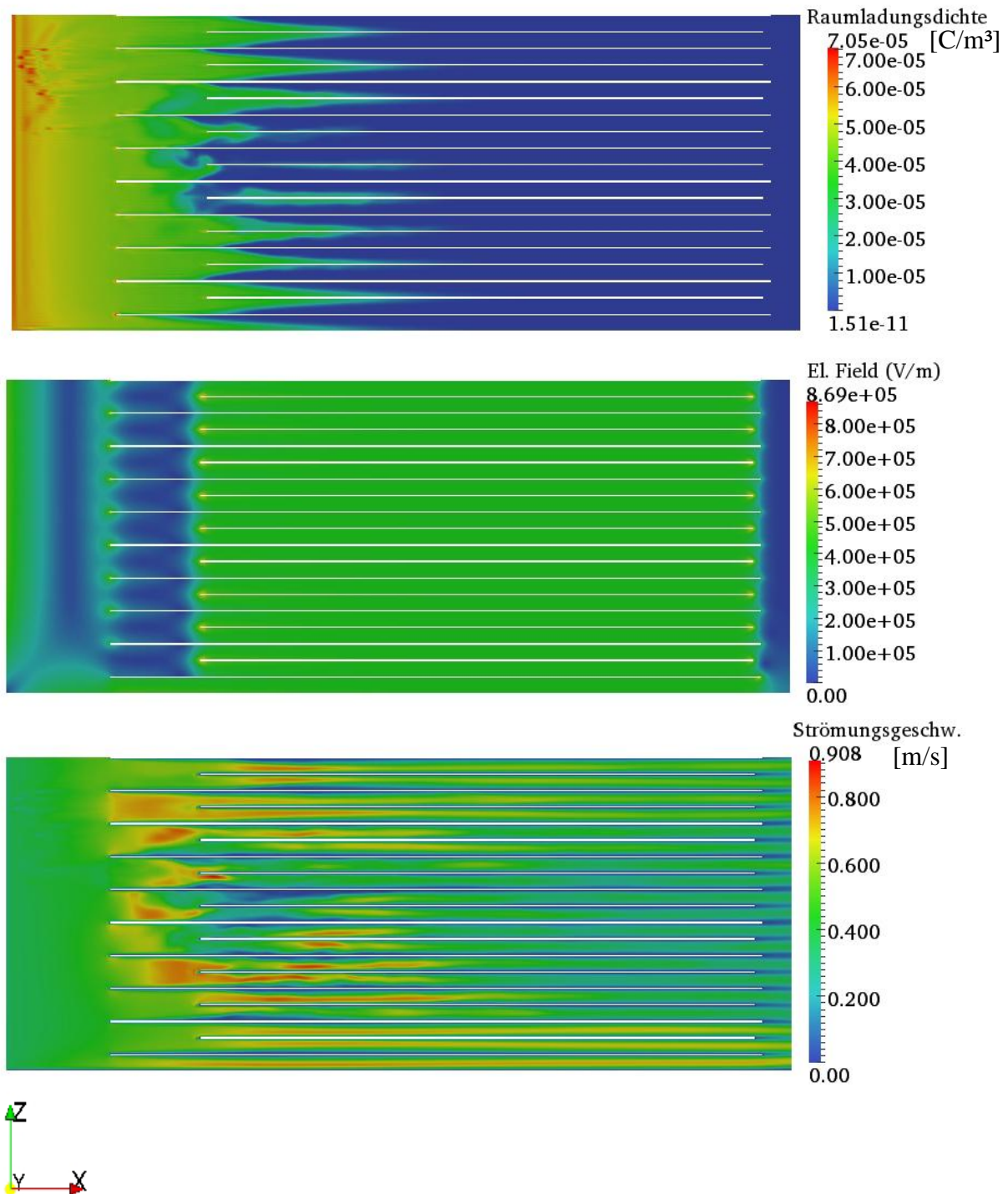


Abbildung 8-28 Modell mit ausgebildeter Strömung. Feines Gitternetz. Y-Achsenschnitt. $t=80$ s; $U_{PFE}=8,39$ kV

Bei $U_{PFE}=0$ kV wird eine etwas höhere Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte des Kollektors beobachtet, was dem erwarteten laminaren Strömungsprofil entspricht. Nach dem Erreichen der Betriebsspannung von 8,39 kV wird die Strömung zwischen Elektrodenplatten deutlich gleichmäßiger. Dabei wird die Strömung am Eintritt in die feldfreie Zone durch die elektrischen Kräfte beeinflusst: es wird eine höhere Strömungsgeschwindigkeit in den Kanälen neben der Wand beobachtet, da der Strömung entgegenwirkendes elektrisches Feld an dieser Stelle am schwächsten ist. Die höhere Strömungsgeschwindigkeit in den Rand-

Gassen kann in eine lokal erhöhte Emission resultieren. Die Abbildung 8-29 zeigt die über die Y-Achse verteilte Raumladungsdichte am Austritt aus der Anlage nach 40 und 80 Sekunden Simulationslaufzeit und bei entsprechend 5 und 8,39 kV PFE-Spannung. Als Ergebnis der höheren Strömungsgeschwindigkeit ist bei 5 kV Elektrodenspannung eine deutlich höhere Raumladungsdichte-Emission in der Nähe der Wand zu sehen. Bei 8,39 kV PFE-Spannung gibt es keinen Einfluss der Strömung zu sehen.

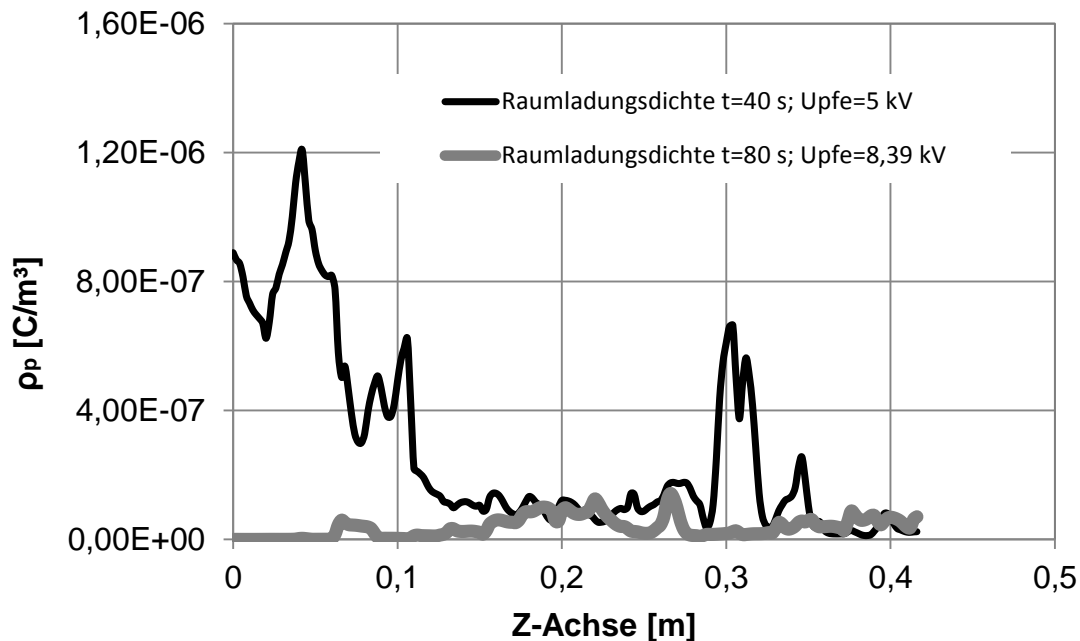


Abbildung 8-29 Simulierte Raumladungsdichten am Austritt aus der Anlage, Y-Achsenschnitt durch die Mitte des simulierten Anlagen-Bereichs

Die Abbildungen 8-30 und 8-31 zeigen simulierte Felder der Raumladungsdichte, elektrischer Feldstärke und der Strömungsgeschwindigkeit im Z-Achsenschnitt (Abbildung 8-19) bei $U_{PFE}=0$ kV ($t=0$ s) und $U_{PFE}=8,39$ kV ($t=80$ s). Der Schnitt zeigt die Mitte des simulierten Anlagen-Domains.

Bei $U_{PFE}=0$ kV ($t=0$ s) wird ein über die Anlagenhöhe gleich verteilter Verlauf der Raumladungsdichte beobachtet. Wegen der schrägen Lage des Strömungsverteilers wird im unteren Bereich der Anlage auf der Anströmseite ein größeres leeres Volumen gebildet. Wird dieses Volumen mit geladenem Aerosol gefüllt, so kommt es zum Anstieg der elektrischen Feldstärke am Strömungsverteiler, das der Strömung im unteren Bereich entgegenwirkt. Als Resultat wird eine lokale Verlangsamung der Strömung beobachtet.

Bei $U_{PFE}=8,39$ kV ($t=80$ s) wird der elektrohydrodynamische Effekt noch deutlicher. In der Mitte der unteren Anlagenhälfte wird eine noch stärkere Verlangsamung der Strömung beobachtet, dagegen steigen die Strömungsgeschwindigkeiten am unteren und oberen Rand stark an. Aus dem Verlauf der Raumladungsdichte ist auch eine hohe Emission an diesen Stellen zu sehen, siehe Abbildung 8-32.

Im Laufe der PFE-Aufladung wird der Anstieg elektrischer Feldstärke in der Nähe des Strömungsverteilers am Aerosol-Einlass beobachtet, was zu erhöhter Teilchenabscheidung an dieser Stelle führt und der Verlangsamung der PFE-Aufladung mitwirkt.

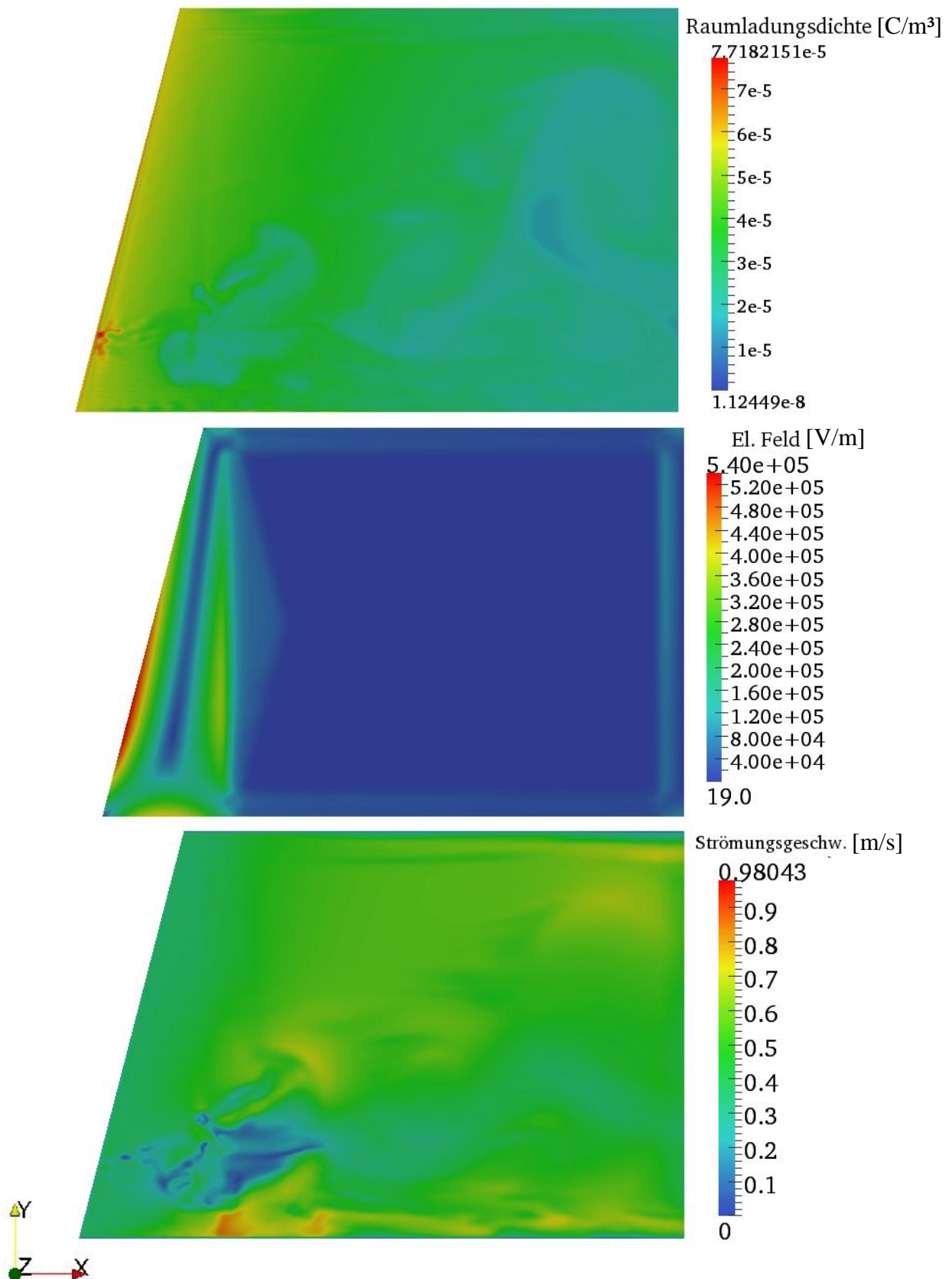


Abbildung 8-30 Modell mit ausgebildeter Strömung. Feines Gitternetz. Z-Achsenchnitt. $t=0$ s; $U_{PFE}=0$ kV

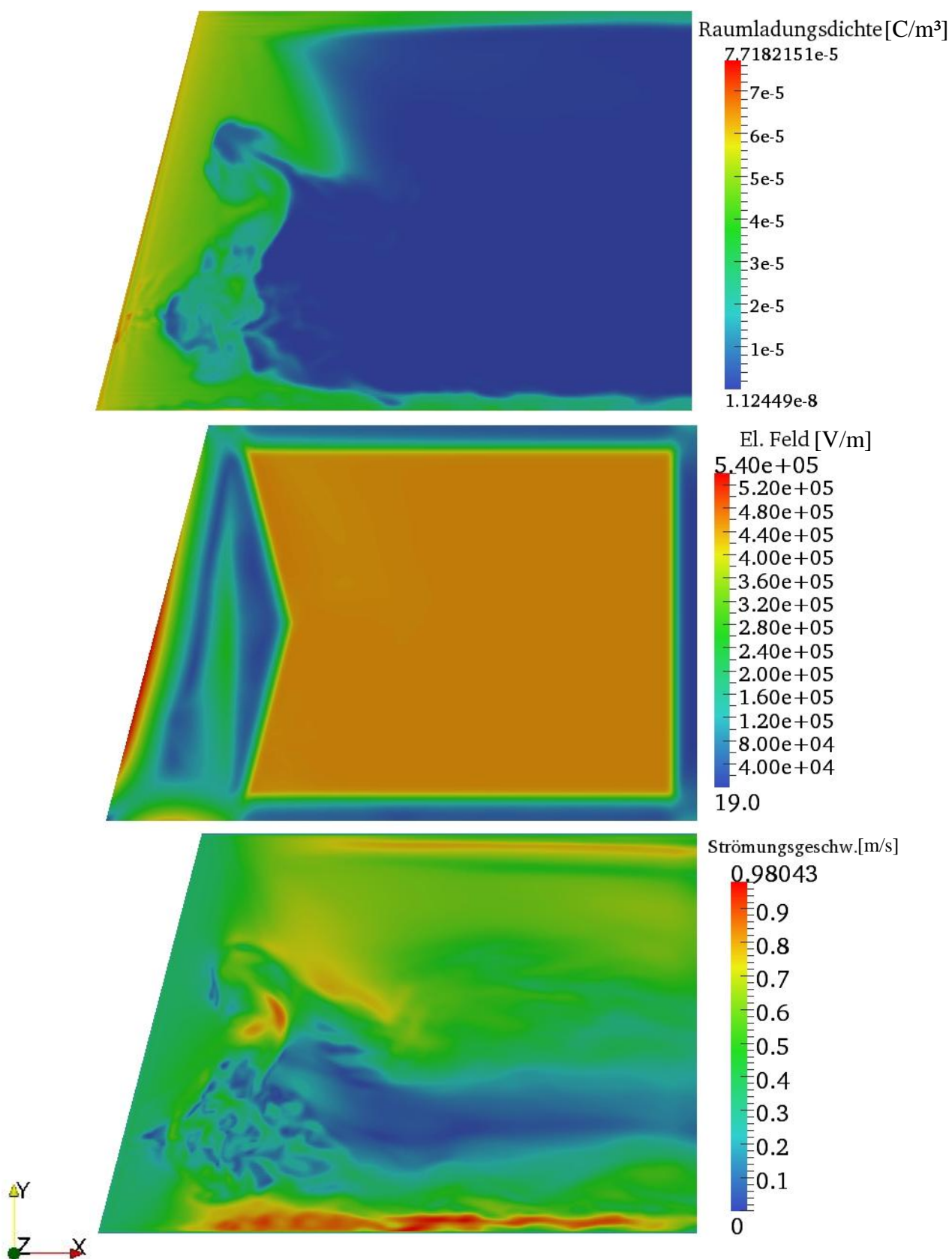


Abbildung 8-31 Modell mit ausgebildeter Strömung. Feines Gitternetz. Z-Achsenschnitt. $t=80$ s; $U_{PFE}=8,39$ kV

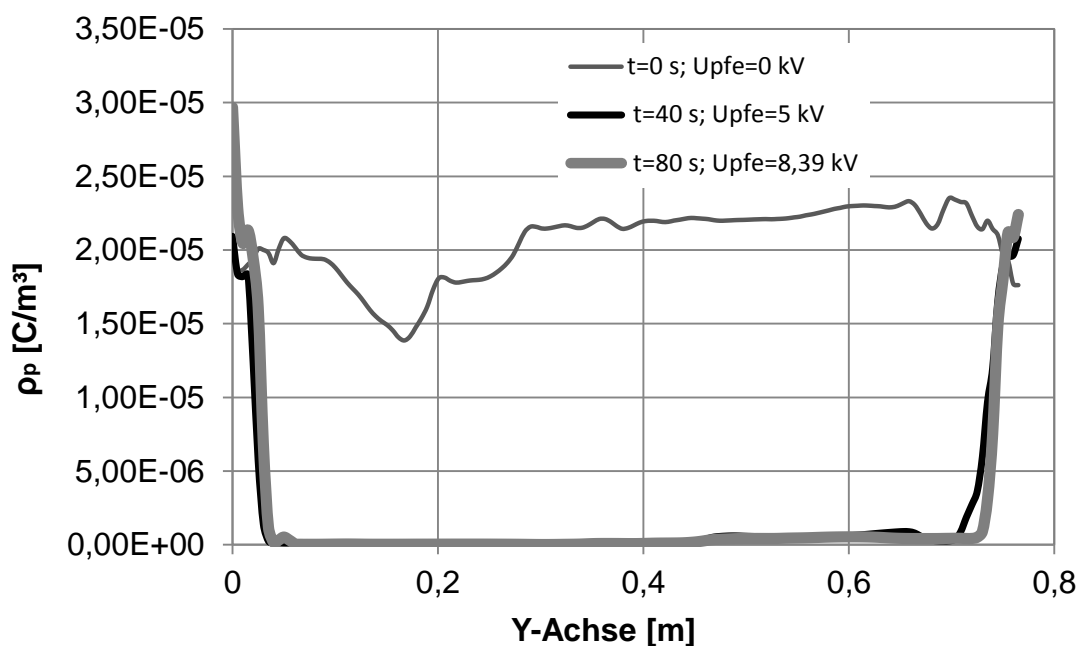


Abbildung 8-32 Simulierte Raumladungsdichten am Austritt aus der Anlage, Z-Achsenschnitt durch die Mitte des simulierten Anlagen-Bereichs

Vergleich der gemessenen und simulierten Trennkurven

Die simulierten Trennkurven am Austritt aus dem Kollektor sind im Vergleich mit gemessenen (Kapitel 8.1.3) in der Abbildung 8-33 dargestellt.

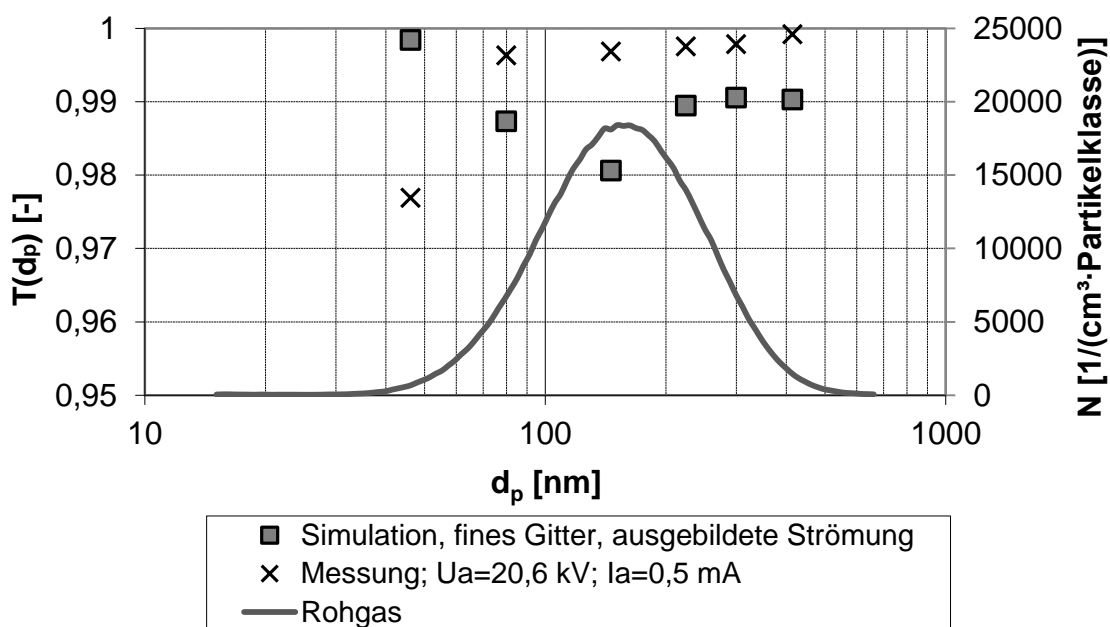


Abbildung 8-33 Vergleich der Trennkurven. ARA-Prototyp für 1000 m³/h

Die analytische Berechnung für eine laminare Strömung anhand der im Kapitel 8.2.5 ermittelten Ausgangsdaten zeigt eine vollständige Abscheidung. Das Simulationsergebnis zeigt ein Abscheideminimum von 98 % bei Partikelgröße von 150 nm, bei anderen

Teilchengrößen liegt der Abscheidegrad bei 99%. Die gemessenen Werte sind etwas höher und liegen im Schnitt bei über 99,5%.

Die während der Simulation werden die Partikelkonzentrationen am Austritt aus dem Plattenpaket ermittelt. Die reale Messung wurde erst am Anlagenausstritt nach dem eingebauten Ventilator durchgeführt. Der Ventilator kann an dieser Stelle für eine zusätzliche Partikelabscheidung sorgen, was diesen Unterschied zwischen simulierten und gemessenen Trennkurven verursachen könnte.

8.3 Bewertung der Ergebnisse

Der ARA-Prototyp wurde in Betrieb genommen und untersucht. Die mit der Laboranlage gewonnenen Erkenntnisse wurden erfolgreich auf den industriellen Prototyp übertragen. Mit einem kompakten Prototypaufbau wurden nahezu identische Werte für Abscheideleistung, Energieeffizienz und Ozonproduktion erreicht.

Die Elektroden mit verschiedenen Blechstärken wurden ausprobiert. Sehr dünne Elektroden (0,5 mm) wiesen einen instabilen Betriebspotentialverlauf auf. Mit 2 mm Elektrodendicke wurde ein stabiler Betrieb erreicht.

Die verwendete Isolator-Konstruktion wurde gegenüber der Laboranlage deutlich vereinfacht. Die Tests haben eine gute Beständigkeit der eingesetzten Polyamid-Isolatoren gegenüber elektrischen Durchschlägen gezeigt. Die Einsatzmöglichkeit bei kleineren Aerosolkonzentrationen von bis zu 28 mg/m³ wurde experimentell überprüft.

Die Vorgänge in der ARA-Stufe wurden mit Hilfe einer 3D-Simulation modelliert. Im Gegenteil zur analytischen Abschätzung der Aufladezeit der potentialfreien Elektrode, die aufgrund der Komplexität der verwendeten Elektrodenanordnung kein befriedigendes Ergebnis liefert, lässt sich die Aufladung der PFE-Elektrode sehr gut mit dem Modell vorhersagen. Mit steigendem PFE-Potential wird eine Strömungs-Umlenkung beobachtet, die zur Bildung der Rand-Strömung im oberen und unteren Anlagenbereichen führt. An diesen Stellen findet auch hauptsächlich die Partikelemission statt. Der nicht-lineare Potentialverlauf während der PFE-Aufladung wird hauptsächlich durch die elektrohydrodynamische Strömung am Eintritt in die Ladungskollektorelektrode verursacht.

9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wurde ein neues Elektroabscheider-Konzept - Autogene Raumladungsgetriebene Abscheidung – entwickelt und untersucht. Das ARA-Konzept vereint in sich neue technische Lösungen aus dem Bereich der elektrostatischen Abscheidung: Eine energieeffiziente Aufladung wird verwirklicht, indem bei hohen Aerosolkonzentrationen der Elektroabscheider am Ende des Quench-Regimes betrieben wird. Weiterhin wird durch die Raumladungsabscheidung in einem feldfreien Bereich der potentialfreien Elektrode ein elektrisches Feld erzeugt, welches der anschließenden Aerosolabscheidung dient.

Durch diesen Aufbau wurde in Bezug auf die Energieeffizienz ein neues technisches Niveau erreicht. Abscheidegrade von über 99,5% wurden bereits bei einem sehr niedrigen spezifischen Energieverbrauch von 20 J/m³ erreicht. Die Abscheidung bei einem stark reduzierten Stromverbrauch bewirkt auch eine deutlich reduzierte Ozonproduktion. Die Ozonkonzentration von 0,1 ppm (MAK-Wert) wurde bei positiver Corona-Polarität deutlich unterschritten. Die experimentellen Arbeiten wurden auf der Basis einer großen Laboranlage (bis 1000 m³/h) und eines Prototyps durchgeführt.

Die Ansätze für die Berechnung einer ARA-Anlage wurden zusammengestellt. Das für die Berechnung eines gequenchten Aufladers verwendete Modell von Lübbert wurde experimentell validiert und zeigte eine sehr gute Anwendbarkeit. Eine 3D-Simulation der ARA-Stufe wurde erstellt. Für die komplexen Ladungskollektor-Anordnungen lassen sich die Vorgänge im Kollektor mit dem Modell sehr gut abbilden.

Die vorgestellte Entwicklung ist auf die Abscheidung von flüssigen hochkonzentrierten Aerosolen gerichtet und schafft auf diesem Gebiet entscheidende Vorteile für die Elektroabscheider-Anwendung. Die bisher im Hintergrund stehenden Betriebskosten gewinnen mit steigenden Energiepreisen mehr an Bedeutung im Vergleich zu den Investitionskosten. Dank hoher Abscheidegraden und sehr geringer Ozonproduktion eignet sich das Verfahren besonders gut für die Einsätze mit einer Raumluftrückführung und ist attraktiv für die Anwender, die bisher aus finanziellen Gründen auf einen Elektroabscheider verzichtet haben.

Während der Untersuchungen ist man auf die Frage der Aerosol-Selbstentladung gestoßen. Die Selbstentladung der Aerosole kommt in mehrstufigen Elektroabscheider-Konstruktionen, die bei hohen Aerosolkonzentrationen eingesetzt werden, vor, führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Abscheideleistung und bleibt oft von den Anlagenbetreibern unbemerkt.

10 Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A_1 [V/m]	Konstante für die Bestimmung der Corona-Einsatzspannung
$A_{FE,gesamt}$ [m ²]	Gesamtfläche der Feldelektrode
A_T [cm ⁻¹ Torr ⁻¹]	Konstante zur Berechnung des Ionisationskoeffizientes
B [m/(Ns)]	mechanische Teilchenbeweglichkeit
B_T [Vcm ⁻¹ Torr ⁻¹]	Konstante zur Berechnung des Ionisationskoeffizientes
B_1 [Vm ^{-0,5}]	Konstante für die Bestimmung der Corona-Einsatzspannung
b [m]	Abstand Sprühdraht-Sprühdraht
b_F [m]	Filmbreite
$C_{FE,gesamt}$ [F]	gesamte elektrische Kapazität der Feldelektrode
c [1/m ³]	Teilchenkonzentration
\bar{c}_i [m/s]	mittlere thermische Geschwindigkeit der Ionen
$c_{ein,LKE}$ [1/m ³]	Konzentration am Eintritt in die Ladungs-Kollektorelektrode
c_L [m/s]	Lichtgeschwindigkeit
c_{LKE} [1/m ³]	Konzentrationsverluste in der Ladungs-Kollektorelektrode
Cu [-]	Cunningham Korrekturfaktor
CFL [-]	Courant-Zahl
d [m]	Durchmesser
d_p [m]	Partikeldurchmesser
d_K [m]	Kollisionsdurchmesser
E [V/m]	Feldstärke
E_a [V/m]	äußere Feldstärk
E_E [V/m]	Einsatz-Feldstärke
$E_{ionisation}$ [eV]	Ionisationsenergie
E_i [V/m]	Ionenraumladungsfeldstärke
E_{mittel} [V/m]	mittlere Feldstärke
E_{NE} [V/m]	Feldstärke an der Niederschlagslektrode
E_p [V/m]	Partikelraumladungsfeldstärke
E_{SE} [V/m]	Feldstärke an der Sprühelektrode
e [C]	Elementarladung
F_{Bild} [N]	Bildkraft
F_E [N]	elektrische Kraft
F_g [N]	Schwerkraft
F_σ [N]	Oberflächenspannungskraft
G_F [S]	Leitwert des Flüssigkeitsfilmes
h [m]	halbe Gassenbreite
h_p [J·s]	Planck-Konstante
I [A]	Strom
I_a [A]	Aufladerstrom

I_{leer} [A]	Leerlaufstrom
I_p [C/s]	partikelgetragener Strom
$I_{p, zu}$ [C/s]	partikelgetragener Strom, der auf die PFE zugeht
J_p [A/m ²]	Teilchenstromdichte
k [J/K]	Boltzmann-Konstante
L [m]	Länge der Sprühelektrode
L_{DMA} [m]	DMA Länge
l_F [m]	Länge des Filmes
M_i [kg/mol]	molare Masse eines Ions
N_a [1/mol]	Avogadro-Konstante
N_e [-]	Elektronenanzahl
N_i [1/m ³]	Ionenkonzentration
$N_{i, \infty}$ [1/m ³]	Ionenkonzentration in großer Entfernung zum Teilchen
n [-]	Anzahl der Ladungen
\bar{n} [-]	mittlere Anzahl der Ladungen pro Partikel
n_m [1/m ³]	Konzentration der Moleküle
p [Pa]	Druck
p_d [Pa]	dynamischer Druck
p_e [Pa]	elektrischer Druck
Q [C]	Gesamtladung
$Q_{FE,1}$ [C]	Ladungsmenge einer Feldelektrode
q_p [C]	Partikelladung
$q_{p, \max}$ [C]	maximale Teilchenladung
q_R [C]	Teilchenmaximalladung (Rayleigh-Limit)
r [m]	Radius
r_a [m]	DMA Außenradius
r_i [m]	DMA Innenradius
r_D [m]	Drahtradius
r_R [m]	Rohrradius
S_s [K]	Sutherland Konstante
s [m]	Gassenbreite
T [K]	absolute Temperatur
t [s]	Zeit
t_f [s]	interne Verzögerungszeit (SMPS)
t_{LKE} [s]	Verweilzeit in der Ladungs-Kollektorelektrode
U [V]	Spannung
U_a [V]	Aufladerspannung
U_E [V]	Einsatzspannung
U_{EV} [V]	Spannung, gemessen mit elektrostatischem Voltmeter
U_{FE} [V]	Spannung an der Feldelektrode
U_{\max} [V]	maximale DMA Spannung

U_{\min} [V]	minimale DMA Spannung
U_{PFE} [V]	Spannung an der potentialfreien Elektrode
u [m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
V [m ³]	Volumen
\dot{V} [m ³ /s]	Volumenstrom
W_{sed} [m/s]	Sedimentationsgeschwindigkeit
Z_i [m ² /V·s]	Ionenbeweglichkeit
Z_p [m ² /(Vs)]	elektrische Teilchenbeweglichkeit

Griechische Buchstaben

α_T [1/cm ³]	Ionisationskoeffizient
β_T [1/cm ³]	Ionenanlagerungskoeffizient
δ_r [-]	relative Dichte
ε_a [-]	relative Dielektrizitätskonstante des Mediums
ε_p [-]	relative Dielektrizitätskonstante des Partikels
ε_0 [As/Vm]	elektrische Feldkonstante
η [Ns/m ²]	dynamische Viskosität
η_m [-]	massenbezogener Trenngrad
η_T [-]	anzahlbezogener Trenngrad
θ [-]	Winkel
Λ [m ³ /s]	Ion-Partikel-Kombinationskoeffizient
λ [m]	mittlere freie Weglänge
λ_w [m]	Wellenlänge
ν [-]	dimensionslose Ladung
ρ_i [C/m ³]	Ionenraumladungsdichte
$\rho_{i,\infty}$ [C/m ³]	Ionenraumladungsdichte in großer Entfernung zum Teilchen
ρ_{ob} [S/m]	Oberflächenleitfähigkeit
ρ_p [C/m ³]	Partikelraumladungsdichte
ρ_{Luft} [kg/m ³]	Luftdichte
σ [N/m]	Oberflächenspannung
τ [-]	dimensionslose Zeit
τ_Q [s]	Zeitkonstante (Feldauffüllung)
φ [V]	elektrisches Potential
ω [-]	dimensionsloses Feld

Abkürzungen

ARA	autogener raumladungsgetriebener Abscheider
EA	Elektroabscheider
FE	Feldelektrode
LKE	Ladungs-Kollektorelektrode
NE	Niederschlagselektrode
PFE	potentialfreie Elektrode
SE	Sprühelektrode

11 Literatur

- [Ada73] Adachi, T., **(1973)** Ionic wind in the electrostatic precipitator – experimental treatment by schlieren Method, *Electr. Eng. Jpn.*, 93 (4), 43-49
- [Ada85] Adachi, M., **(1985)** Unipolar and bipolar diffusion charging of ultrafine aerosol particles, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 16, No 2, 109-123
- [Alo00] Alonso, M., **(2000)** Electrostatic dispersion phenomena in DMA, *J. Aerosol Sci.* Vol. 31, Suppl. 1, 15-16
- [Ale08] Aleksandrov, N. L., **(2008)** Corona initiated from grounded objects under thunderstorm conditions and its influence on lightning attachment, *Plasma Sources Sci. Technol.* 17, 024015
- [Ami53_01] Amin, M. R., **(1953)**, Fast time analysis of intermittent point-to-plane corona in air. I. The positive point burst pulse corona, *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, No 2, 210-216
- [Arg80] Argo, W. B., **(1980)** Electrostatically augmented fiber bed and method of using, *US Patent* 4,222,748
- [Awa75] Awad, M.B., **(1975)** Ozone generation in an electrostatic precipitator with a heated corona wire, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 25, 369-374
- [Bai97] Bailey, A. G., **(1997)** The inhalation and deposition of charged particles within the human lung, *Journal of Electrostatics* 42, 25-32
- [Bar90_1] Baron, P. A., **(1990)** Electrostatic effects in asbestos sampling I: experimental measurements, *American Industrial Hygiene Association Journal* 51 (2), 51-62
- [Bar90_2] Baron, P. A., **(1990)** Electrostatic effects in asbestos sampling II: Comparison of theory and experiment, *American Industrial Hygiene Association Journal* 51 (2), 63-69
- [Bar02] Barat, R. B., **(2001)** The effect of particle size distribution on the deposition of charged particles in tubes, *Advances in Environmental Research* 7, 105-115
- [Bat73] Batel, W., **(1973)** Der Elektroentstauber Entwicklungsstand und -Tendenzen, *Staub-Reinhaltung der Luft* 33, Nr. 3
- [Bed09] Bedmutha, R. J., **(2009)** Single and two-stage electrostatic demisters for biomass pyrolysis application, *Chemical Engineering and Processing* 48, 1112-1120
- [Boe97] Boelter, K. J., **(1997)** Ozone generation by indoor, electrostatic air cleaners, *Aerosol Science and Technology* 27:6, 689-708
- [Bol01] Bologna, A., **(2001)** Electrostatic charging of aerosol as a mechanism of gas cleaning from submicron particles, *Filtech Europa 2001 Presentation, Filtration+Separation*

- [Bol05] Bologna, A., **(2005)** Pilot-plant testing of a novel electrostatic collector for submicrometer particles, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, NO. 4
- [Bol09] Bologna, A., **(2009)** Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol, *Journal of Electrostatics* 67, 150-153
- [Bos77] Boschung, P., **(1977)** An experimental contribution to the question of the existence of lightning-like discharges in dust clouds, *Journal of Electrostatics* 3, 303-310
- [Bou93] Boutlenj, M., **(1993)** Pre-breakdown streamer pulses in long air gaps under positive direct voltages, *J. Phys. D.: Appl. Phys.* 26, 760-766
- [Boy66] Boyd, H. A., **(1966)** Sparkover in long uniform-field gaps, *Nature*, Volume 210, Issue 5037, 719-720
- [Bur35] Burkhardt, E., **(1935)** Die Erzeugung hoher Spannungen mit Hilfe eines monopolar beladenen Luftstromes, *Annalen der Physik*, 5. Folge, Band 23, 339-370
- [Cas84] Castle, G. S. P., **(1984)** Modelling of corona quenching phenomena in duct-type electrostatic precipitators, *Proceedings of the Second International Conference on Electrostatic Precipitation*, Kyoto, 532-539
- [Cas01] Castle, G. S. P., **(2001)** Industrial applications of electrostatics: the past, present and future, *Journal of Electrostatics* 51-52, 1-7
- [Cha95] Chang, J.-S., **(1995)** Handbook of electrostatic processes, *Marcel Dekker, Inc., New York*
- [Cha03] Chang, J.-S., **(2003)** Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems, *Journal of Electrostatics* 57, 273-291
- [Che02] Chen, J., **(2002)** Ozone production in the positive DC corona discharge: model and comparison to experiments, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 22, No 4, 495-521
- [Che03] Chen, J., **(2003)** Ozone production in the negative dc corona: the dependence of discharge polarity, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 3, 501-518
- [Che09] Chen, J., **(2009)** Numerical modelling of ozone production in a wire-cylinder corona discharge and comparison with a wire-plate corona discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42
- [Clo94] Cloupeau, M., **(1994)** Recipes for use of EHD spraying in cone-jet mode and notes on corona discharge effects, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 6, 1143-1157
- [Das96] Dascalescu, L., **(1996)** Dielectric behaviour of particle-contaminated air-gaps in the presence of corona, *Journal of Electrostatics* 36, 253-275
- [Das00] Dascalescu, L., **(2000)** Electrode protrusions and particle chaining as Factors Affecting the Dielectric Strength of Air, *IEEE Transactions on Industry Applications*, VOL. 36, NO. 2

- [Deu22] Deutsch, W., (1922) Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator, *Annalen der Physik* 68, 335-344
- [Deu31] Deutsch, W., (1931) Über die raumladungsbeschwerte Townsend-Entladung im dichten Nebel, *Annalen der Physik* 5. Folge, 10
- [Dev56] Devins, J. C., (1956) Mechanism of ozone formation in the silent electric discharge, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 103, Issue 8, 460-466
- [Eic76] Eichhorn, R. M., (1976) Treeing in solid extruded electrical insulation, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-12, No. 1
- [Fai67] Faith L., (1967) Particle precipitation by space charge in tubular flow, *I&EC Fundamentals*, Vol. 6, No. 4
- [Fel80] Feldman, P. L., (1980) High voltage wetted parallel plate collecting electrode arrangement for an electrostatic precipitator, *US Patent* 4,189,308
- [Fos58] Foster, W. W., (1958) Deposition of unipolar charged aerosol particles by mutual repulsion, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 10
- [Fuc63] Fuchs, N. A., (1963) On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere, *Pure Appl. Geophys.*, 56 (1), 185-192
- [Han69] Hanson D. N., (1969) Electrostatic precipitator analysis, *I&EC Process Design and Development*, Vol. 8, No. 3
- [Har11] Harrison, R., (2011) Enhancement of cloud formation by droplet charging, *Proc. R. Soc. A* 464, 2561-2573
- [Hau86] Hautanen, J., (1986) Optimization of filtration efficiency and ozone production of the electrostatic precipitator, *J. Aerosol Sci.* 17 ,622 – 626
- [Hel82] Helfritsch, D. J., (1982) Electrostatically augmented cartridge type dust collector and method, *US Patent* 4,357,151
- [Hew63] Hewitt, G.W., (1963) Voltage endurance tests of insulating materials under corona conditions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 82, Issue 69, 1033-1039
- [Hig01] Higashiyama, Y., (2001) Electrical discharge occurring from a space charge cloud formed with charged particles, *Journal of Electrostatics* 51-52, 381-386
- [Hig07] Higashiyama, Y., (2007) Electrical discharge occurring between a negatively charged particle cloud and a grounded sphere electrode, *Journal of Physics: Conference Series* 142, 012002
- [Hin99] Hinds, W. C., (1999) Aerosol technology: properties, behaviour and measurement of airborne particles – 2nd. Ed., *John Wiley & Sons*

- [Hua02] Huang, S.-H., **(2002)** Ultrafine aerosol penetration through electrostatic precipitators, *Environ. Sci. Technol.* 2002, 36, 4625-4632
- [Ied80] Ieda, M., **(1980)** Dielectric breakdown process of polymers, *IEEE Transactions on Electrostatic Insulation*, Vol. EI-15, No. 3
- [Jaw07] Jaworek, A., **(2007)** Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: a brief review, *Journal of Electrostatics* 65, 133-155
- [Kar08] Karpov, S. V., **(2008)** Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL multiphysics, *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, Paper E1
- [Kas80] Kasper G., **(1980)** Electrostatic dispersion of homopolar charged aerosols, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 81, No. 1
- [Kat01] Katzer, M., **(2001)** Collision kinetics and electrostatic dispersion of airborne submicrometer fractal agglomerates, *Journal of Colloid and Interface Science* 240, 67-77
- [Kim98] Kim, S. S., **(1998)** Effects of particle space charge and turbulent diffusion on performance of plate-plate electrostatic precipitators, *Journal of Electrostatics* 45, 121-137
- [Kre93] Kreuger, F. H., **(1993)** Classification of partial discharges, *IEEE Transactions on Electric Insulation*, Vol. 28, No. 6
- [Kou85] Kouichi, Y. **(1985)** Controlling method of air purge of insulator of electric dust collector, *Patent JP60028837*
- [Lag81] Laghari, J. R., **(1981)** A review of particle-contaminated gas breakdown, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-16, No. 5
- [Lai97] Laitinen, A., **(1997)** Effect of the space charge precipitation on wet scrubber fine particle removal efficiency, *J. Aerosol Sci.* Vol 28, Suppl. 1, S287-S288
- [Lai00] Laitinen, A., **(2000)** Preformed spray scrubber: Comparison of precipitation mechanisms for charged fine particles, *J. Aerosol Sci.* Vol 31, Suppl. 1, S158-S159
- [Lam73] Lama, L., **(1973)** Interaction of the Trichel current pulses of a pair of negative coronas, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 6, 1963-1972
- [Lar09] Jewell-Larsen, N. E., **(2009)** Coupled-physics modeling of electrostatic fluid accelerators for forced convection cooling, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
- [Law96] Lawless, P. A., **(1991)** Particle charging bounds, symmetry relations, and an analytic charging rate model for the continuum regime, *J. Aerosol Sci.*, Vol 27, No. 2, 191-215
- [Lun95] Lundgren, D. A., **(1995)** A two-zone wet electrostatic precipitator, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, Suppl 1, S877-S878
- [Lia08] Liang, Z. H., **(2008)** Air purifier with ozone reduction arrangement, *United States Patent US 7,431,752 B2*

- [Liu00] Liu, L., **(2000)** The effect of wire heating and configuration on ozone emission in a negative ion generator, *Journal of Electrostatics* 48, 92-91
- [Loh00] Lohmann, M., **(2000)** Herstellung von Partikeln durch elektrostatische Zerstäubung von Flüssigmetallen in gasförmiger Umgebung, *Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg*
- [Löf88] Löffler, F., **(1988)** Staubabscheiden, *Georg Thieme Verlag Stuttgart - New York* .
- [Lüb11] Lübbert, C., **(2011)** Zur Charakterisierung des gequenchten Zustandes im Elektroabscheider, *Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus*
- [Mar06] Marquard, A., **(2006)** Unipolare Aufladung nanoskaliger Aerosolpartikeln bei hohen Ladungsträgerdichten, *Dissertation, Universität Karlsruhe*
- [Mat84] Matts, S., **(1984)** Some space charge problems encountered with large electrode spacing, *Proceedings of the Second International Conference on Electrostatic Precipitation, Kyoto, Japan*, 911-919
- [May85] Mayer-Schwinning, G., **(1985)** Fortschritte bei der Abscheidung von Stäuben im Elektrofilter unter Berücksichtigung der Schadgas-Adsorption, *Chem.-Ing.-Tech.* 75, Nr. 6, 493-500
- [Mca91] McAllister, I.W., **(1991)** Surface Current Density K, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 3
- [Mcl65] McIlhagger, D. S., **(1965)** Insulator surface conduction, *Proc. IEE*, Vol. 112, No. 7
- [Mcl88] McLean, K. J., **(1988)** Electrostatic precipitators, *IEE Proceedings*, Vol. 135, Pt. A, No. 6
- [Mee53] Meek, J. M., **(1953)** Electrical breakdown of gases, *At the Clarendon Press, Oxford*
- [Met97] Metzler, P., **(1997)** Electrostatic enhancement of dust separation in a nozzle scrubber, *Journal of Electrostatics* 42, 123-141
- [Mil89] Miller, H. C., **(1989)** Surface flashover of insulators, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 5
- [Mil92] Miller, J., **(1992)** Simulation des elektrischen Feldes in Elektrofiltern unter Berücksichtigung von Raumladungen, *Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung, 8. Kolloquium, Karlsruhe*, 421-439
- [Mil93] Miller, J., **(1993)**, Feinstaubabscheidung einer Elektrofilteranlage mit gepulster Spannungsversorgung, *Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinigung (PEF), 9. Kolloquium, Karlsruhe*
- [Mil93] Miller, H. C., **(1993)** Flashover of Insulators in Vacuum, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 4

- [Nai95] Naidu, M. S., **(1995)** High voltage engineering. Second edition, *Tata McGraw-Hill Publishing Company*, ISBN 0-07-462286
- [Nar81] Natarajan, S., **(1981)** Electrostatic particle collecting apparatus, *US-Patent* No. 4,264,343
- [Nit78] Nitta, T., **(1978)** Factors controlling surface flashover in SF₆ gas insulated systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No, 3
- [Ohi95] Ohlenschläger, P., **(1995)** Verfahren und Vorrichtung zur Beheizung einer Isolator-kammer, *Patent* DE 19548238C1
- [Par97] Parker, K. R., **(1997)** Applied electrostatic precipitation, *Blackie Academic & Professional*, ISBN 0 7514 0266 4
- [Pau32] Pauthenier, M. M., **(1932)** La charge des particules sphériques dans un champ ionisé, *Journal de Physique et le Radium*, Vol. 3, Nr. 12, 590-613
- [Pau10] Paur, H.-R., **(2010)** Elektrostatischer Abscheider zur Partikelabscheidung, *Patent* EP 2 266 703 A1
- [Pen89] Penney, G. W., **(1989)** Close-spaced electrostatic precipitator, *US-Patent* No 4,861,356
- [Pep98] Pepin, M. P., **(1998)** Charge injection and conduction on the surface of insulators, *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, Nr. 11
- [Pil74] Pilat, M. J., **(1974)** Collection of aerosol particles by electrostatic droplet spray scrubbers, *Environmental Science and Technology*, Vol. 8, 360
- [Pla00] Plaks, N., **(2000)** Enhancement of electrostatic precipitation with precharged particles and electrostatic field augmented fabric filtration, *US Patent* 6,152,988
- [Pon97] Pontiga, F., **(1997)** Electrical and chemical model of negative corona in oxygen at atmospheric pressure, *Journal of Electrostatics* 40&41, 115-120
- [Pos77] Postma, A. K., **(1977)** Electrostatic removal of airborne particulates employing fiber beds, *US Patent* 4,029,482
- [Pot75] Potter, E.C., **(1975)** What size precipitator? A new basis for designing plant to specified dust-extraction performance. *Clean Air Conference: international conference of the Clean Air Society of Australia*
- [Pro85] Prodi, V., **(1985)** Electrostatic lung deposition experiments with humans and animals, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 29, No. 2, 229-240
- [Rai00] Raizer, Y. P., **(2000)** Gas discharge physics, *Springer Verlag*, ISBN 3-540-19462-2
- [Rau82] Rauschenberger, H., **(1982)** Vorrichtung zur Reinhaltung von Stützisolatoren in Elektroabscheidern, *Patent* DE 3209412C2

- [Ray01] Ray, I., **(2001)** Modular condensing wet electrostatic precipitators, *US Patent* 6,294,003 B1
- [Rec93] Rector, C. A., **(1993)** Venturi Isolator für einen elektrostatischen Abscheider, *Patent* DE 69318655T2
- [Ree97] Reess, T., **(1997)** The role of the field-effect emission in Trichel pulse development in air at atmospheric pressure, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, 3115-3122
- [Rie04] Riebel, U., **(2004)** Vorrichtung zum Abreinigen von Elektroden und Verfahren zum Betreiben der Vorrichtung, *Patent* DE 10300549A1
- [Rie11] Riebel, U., **(2011)** Verfahren zur elektrischen Abscheidung von Aerosolen und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, *Patent* EP2352595 A1
- [Rob71] Robinson, M., **(1971)** Electrostatic precipitation, in: W. Strauss: Air pollution control, *John Wiley & Sons, Inc., New York*, 241-313
- [Rus84] Russell-Jones, A., **(1984)** Electrostatic gas cleaning, *UK Patent* GB 2135599A
- [Saa84] Saad, A., **(1984)** Surface conduction and losses of an insulator wetted by a liquid dielectric, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-19, No. 3
- [Sal92] Salm, J., **(1992)** Electrostatic dispersion of charged aerosol particles, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, Suppl. 1, S97-S99
- [Sal93] Salm, J., **(1993)** Electrostatic dispersion of charged aerosol particles: a sum of normal mobility distributions, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 24, Suppl. 1, S125-S126
- [Sch06] Schmatloch, V., **(2006)** Elektrofilter mit Selbstreinigungseinrichtung für eine Feuerungsanlage, *Patent* DE 102006003028A1
- [Sie91] Siebenhofer, M., **(1991)** Aerosolabscheidung durch Ionisationswäscher, *Chem.-Ing.-Tech.* 63, Nr. 9, 904-910
- [Sto06] Stommel, Y. G., **(2006)** Neutralisation submikroner Aerosole durch hochfrequente Corona-Entladung, *Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus*
- [Sur81] Surati, H. S., **(1981)** Tubular electrostatic precipitators of two-stage design, *Environment International*, Vol. 6, 239-244
- [Szy85] Szymanski, W. W., **(1985)** Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration, *Ann. Occup. Hyg.* Vol. 29, No. 2, 251-269
- [Tak84] Takashi, S., **(1984)** Blowing method of purge gas for insulator of electrostatic precipitator, *Patent* JP59160553
- [Tep07] Tepper, G., **(2007)** An electrospray-based, ozone-free air purification technology, *Journal of Applied Physics* 102, 113305

- [Tep08] Tepper, G., **(2008)** A study of ionisation and collection efficiencies in electrospray-based electrostatic precipitators, *Journal of Aerosol Science* 39, 609-617
- [Tur69] Turnbull, R. J., **(1969)** Electrohydrodynamic Rayleigh-Taylor Bulk Instability, *The Physics of Fluids*, Volume 12, Number 6
- [Uzh62] Uzhov, V. N., **(1962)** Ochistka promyshlennih gazov elektrofiltrami, *Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo himicheskoi literaturi, Moskva*
- [Vla95] Vlastos, A. E., **(1995)** Insulator Surface Conduction State and Surface Flashover Voltage, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report*
- [Wad97] Wadenpohl, C., **(1997)** Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines gespülten Rohrelektrofilters, *Chemie Ingenieur Technik* 69, 345-349
- [Wal97] Walzel, P., **(1997)** Elektrostatisches Zerstäuben von Flüssigkeiten, *Chemie Ingenieur Technik* 69, 1066-1073
- [Wan09] Wang, P., **(2009)** Numerical modelling of ozone production in a wire-cylinder corona discharge and comparison with a wire-plate corona discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42
- [Whi63] White, H. J., **(1963)** Industrial electrostatic precipitation, *Addison-Wesley publishing company, Inc., Reading, Massachusetts, Paolo Alto, London*
- [Wil47] Wilson, I. B., **(1947)** The deposition of charged particles in tubes, with reference to the retention of therapeutic aerosols in the human lung, *Journal of Colloid Science*, Volume 2, Issue 2, 271-276
- [Wil76] Willeke, K., **(1976)** Temperature dependence of particle slip in a gaseous medium, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 7, 381-387
- [Wol33] Wolodkewitsch, N., **(1933)** Untersuchungen über die “elektrische Diffusion” der Ionen in gasen unipolarer Beladung, *Annalen der Physik*, 5. Folge. Band 16
- [Wol33_2] Wolodkewitsch, N., **(1933)** Über die elektrische Diffusion der Ionen in Gasen bipolarer Beladung, *Zeitschrift für Physik*. Bd. 84
- [Xu09] Xu, Z., **(2009)** A new electrostatic dispersion method for fine powder in air, *Advanced Materials Research*, Vol. 58, 1-13
- [Yag79] Yagi, S., **(1979)** Mechanism of ozone generation in air-fed ozonisers, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 12, 1509-1520
- [Yeh07] Yehia, A., **(2007)** Calculation of ozone generation by positive dc corona discharge in coaxial wire-cylinder reactors, *Journal of Applied Physics* 101, 023306
- [Yu76] Yu, C. P., **(1976)** Precipitation of unipolarly charged particles in cylindrical and spherical vessels, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 8, 237-241

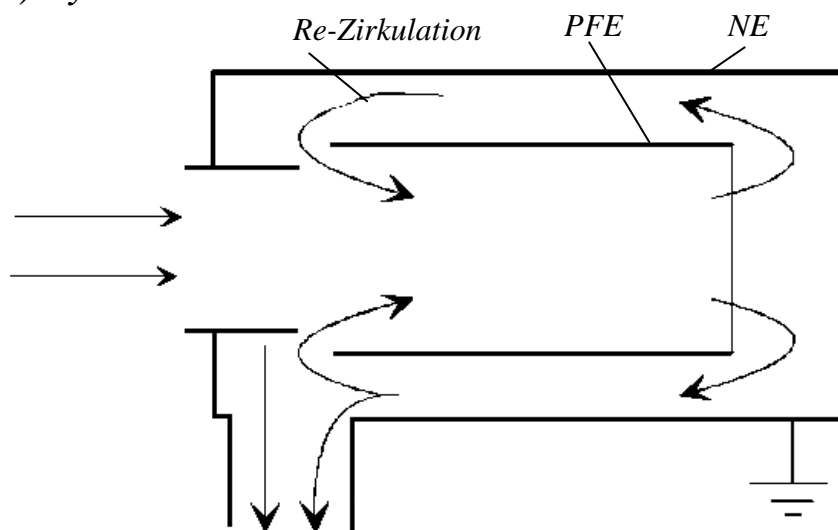
- [Yu77] Yu, C. P., **(1977)** Precipitation of submicron charged particles in human lung airways, *Bulletin of mathematical biology*, Volume 39
- [Yu79] Yu, C.P., **(1979)** Sedimentation from charged Aerosol flows in parallel-plate and cylindrical channels, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 10, 405-410
- [Yu11] Yu, K.-P., **(2011)** Evaluation of ozone generation and indoor organic compounds removal by air cleaners based on chamber tests, *J. Atmos. Env.* 45, 35-42
- [Zel87] Zeller, H. R., **(1987)** Breakdown and pre-breakdown phenomena in solid dielectrics, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-22, No.2
- [Zeb57] Zebel, G., **(1957)** Zur Theorie des Verhaltens elektrisch geladener Aerosole, *Kolloid-Zeitschrift*, Band 157, Heft 1, 37-50

12 Anhang

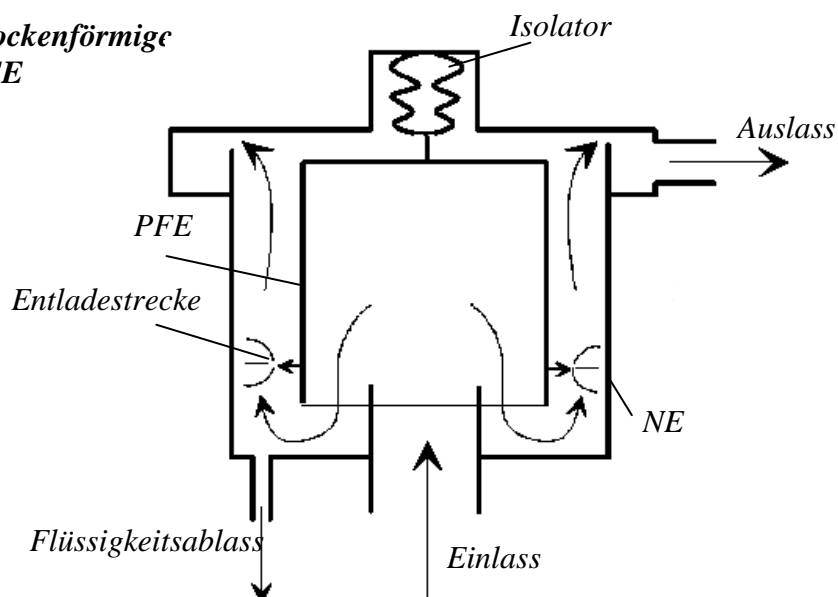
12.1 ARA-Aufbauten

In der Abbildung 12-1 werden weitere mögliche ARA-Aufbauten dargestellt [Rie11]. Die Abbildung a) zeigt den Aufbau mit einer zylindrischen potentialfreien Elektrode. In der Abbildung b) wird eine glockenförmige PFE dargestellt. Hier ist eine Entladestrecke im Gasraum installiert. In der Abbildung c) wird eine zylindrische, zum Teil durchströmte PFE gezeigt. Die Entlade-Strecke in einer Kaskadenform wird außen aufgebaut. Die Plattenbauweise der PFE wird in der Abbildung d) gezeigt.

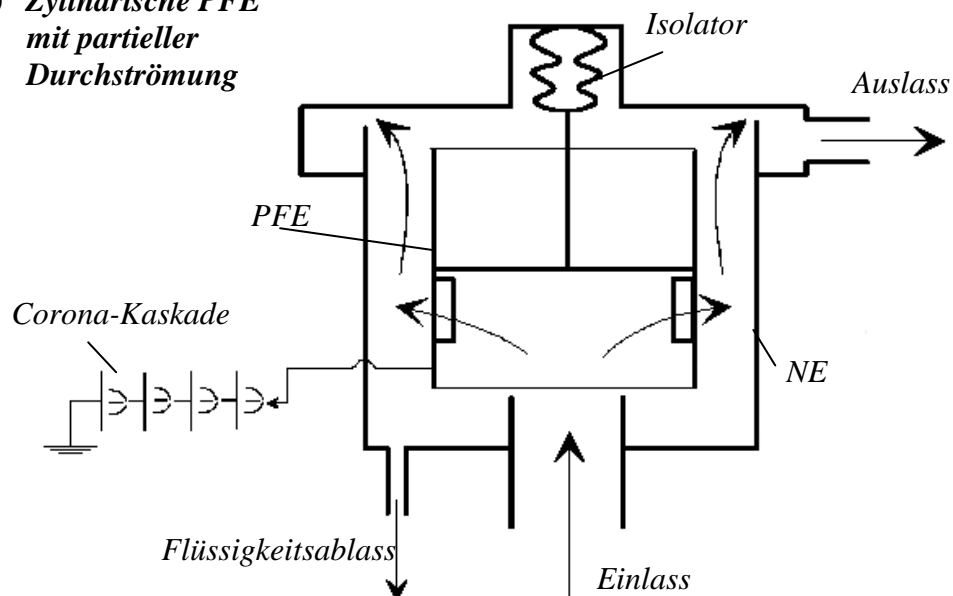
a) *Zylindrische PFE*



b) *Glockenförmige PFE*



c) *Zylindrische PFE mit partieller Durchströmung*



d) *Plattenbauweise*

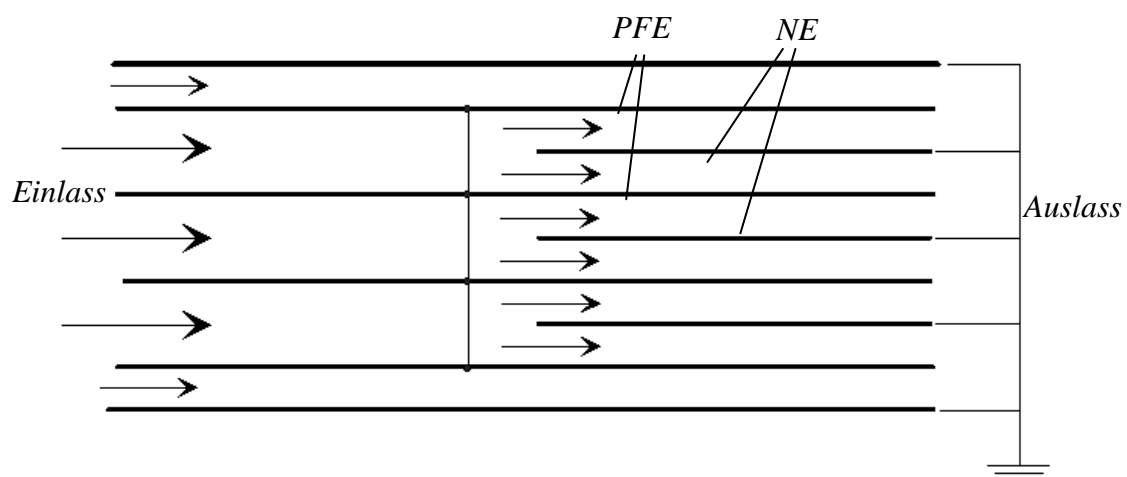


Abbildung 12-1 Varianten des Aufbaus von ARA-Stufe [Rie11]

12.2 1-D Simulation nach Lübbert. Programmalgorithmus

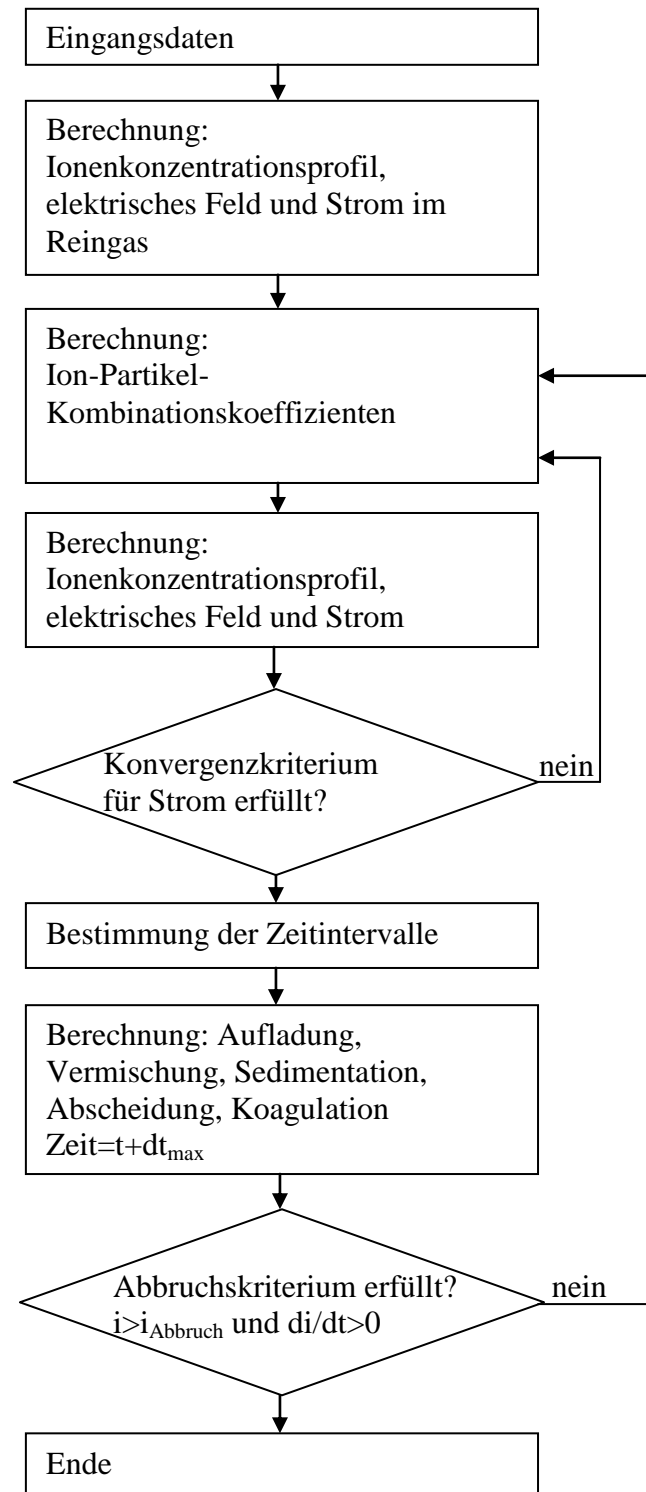


Abbildung 12-2 Programmablaufplan [Lüb11]

12.3 Zur Anordnung der Elektroden im Plattenpaket

Um eine günstige Elektrodenposition bezüglich der Minderung elektrischer Feldstärken an Plattenkanten zu bestimmen, wurde eine 2-D-Simulation mittels FemLab erstellt. Eine Geometrie aus 2 mm dicken, mit Abstand von 20 mm abwechselnd folgenden Feld- und Niederschlagselektroden wurde dargestellt, und die Feldstärken an den Plattenkanten wurden berechnet. Eine Anordnung mit gleich langen Platten, mit um eine halbe Gassenbreite versetzten Platten und mit um eine ganze Gassenbreite versetzten Platten wurden simuliert (Abbildung 12-3).

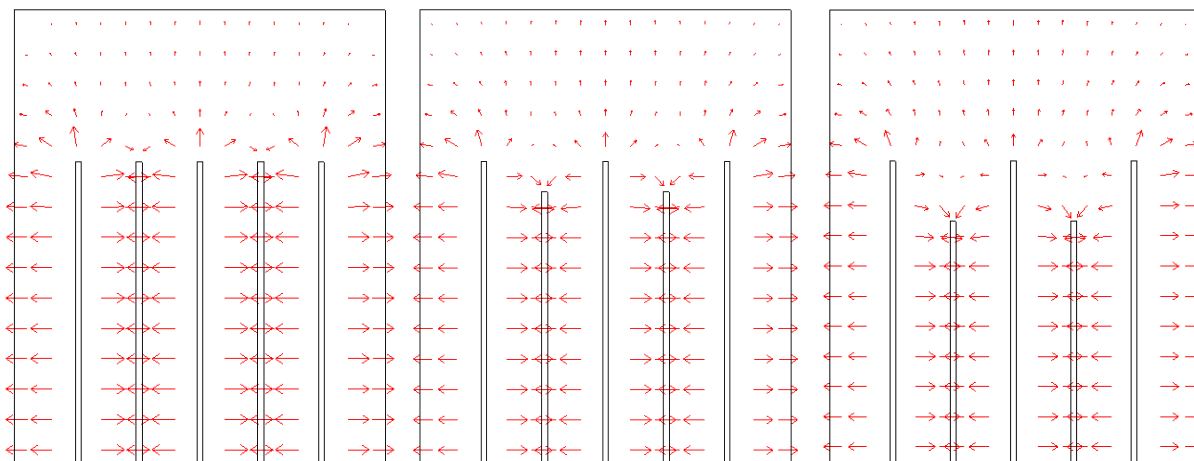


Abbildung 12-3 Elektrodengeometrien im FemLab.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in der Abbildung 12-4 dargestellt. Bei gleich langen Elektroden ist die Feldstärke an den FE-Kanten viel höher, als die an den NE-Kanten. Bei einer um die halbe Gassenbreite versetzten Anordnung sind die Feldstärken insgesamt etwa gleich hoch. Mit stärkerer Versetzung sieht man einen gegenteiligen zur ersten Anordnung Effekt: die Feldstärke an den NE-Kanten ist viel höher, als die an den FE-Kanten.

Angesichts dessen, dass die Entladungen zwischen den Elektroden im Plattenpaket überwiegend in Bereichen höchster Feldstärken auftreten und die Betriebsspannung limitieren, ist eine um eine halbe Gassenbreite versetzte Elektrodenanordnung zu bevorzugen.

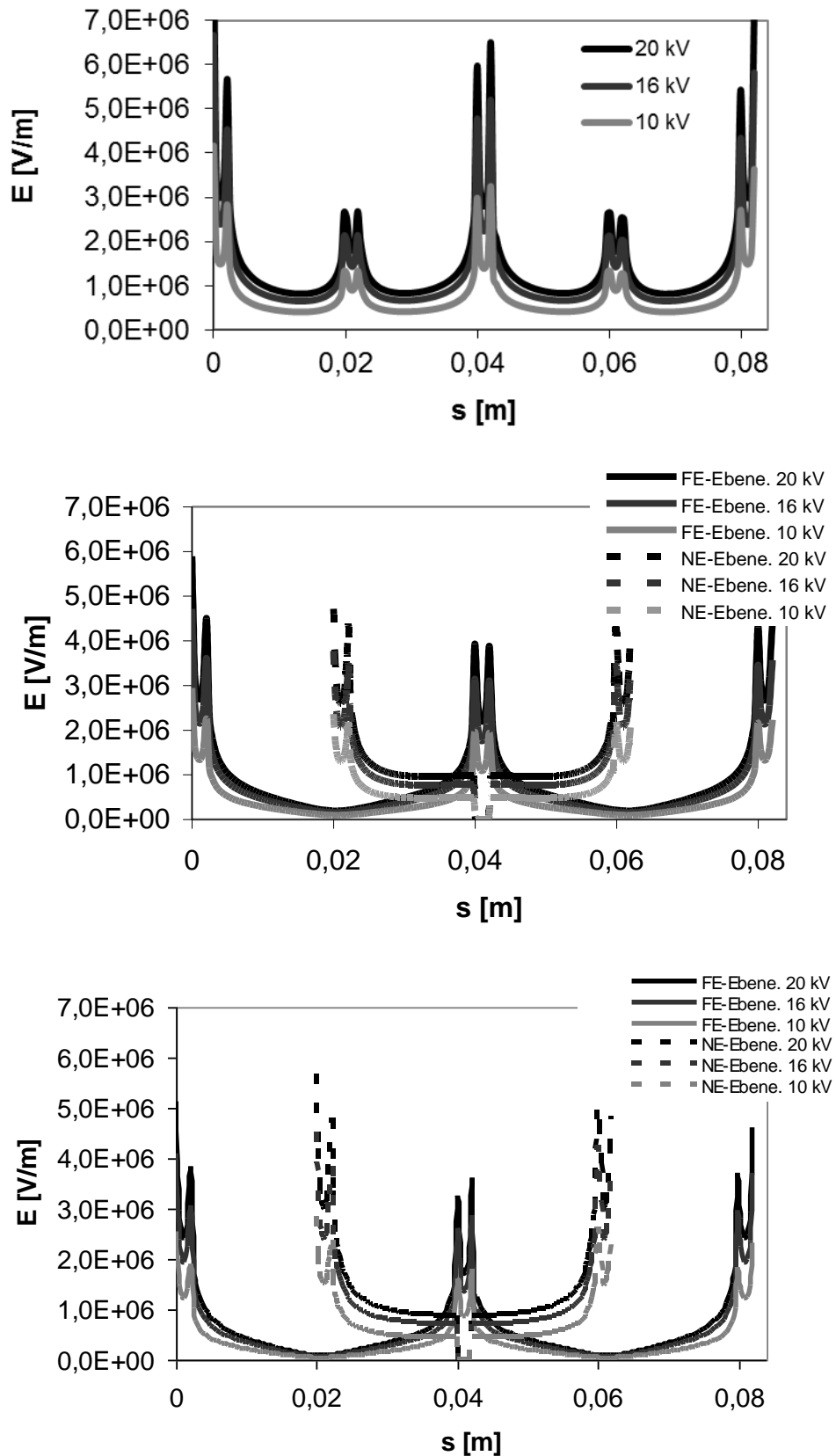


Abbildung 12-4 Elektrische Feldstärken auf den Elektrodenkantenebenen. 2-D Simulation im FemLab. Oben: gleich lange Platten; Mitte: um halbe Gassenbreite versetzt; Unten: um eine Gassenbreite versetzt.